

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЖИГАНИЯ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЫСОКОРЕАКЦИОННЫХ ДОБАВОК

В.Е. Мессерле¹, А.Л. Моссэ², Г. Паскалов³, К.А. Умбеткалиев¹, А.Б. Устименко⁴

¹Институт проблем горения, Алматы, Казахстан

²Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

³ТОО «Plasma Microsystems», Калифорния, США

⁴ТОО «Плазматехника R&D», НИИ Экспериментальной и теоретической физики КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Дата поступления:

4 Апреля 2019

Принято на печать:

24 Мая 2019

Доступно онлайн:

6 Июля 2019

УДК: 621.039.6; 536.46:533.6

АННОТАЦИЯ

В данной работе представлены результаты расчетных и экспериментальных исследований влияния органических высокореакционных топливных добавок на эффективность сжигания высокозольного энергетического угля, включая экологические показатели процесса. Предложено техническое решение по разработке технологии совместного сжигания твердых топлив с органическими высокореакционными топливными добавками (ОВТД) и созданию специализированной камеры сгорания с системой плазменного запуска, выполнены термодинамический анализ и кинетический расчет процесса совместного сжигания твердых топлив с ОВТД, на основе которого выбраны оптимальные температуры процесса, коэффициент избытка воздуха и геометрические параметры специализированной камеры сгорания. Термодинамические расчеты процесса сжигания Экибастузского угля показали, что для сжигания 1 кг угля требуется 7 кг воздуха. При использовании ОВТД выявлена тенденция возрастания в продуктах сгорания угля концентраций CO_2 , H_2O и соответствующего снижения концентраций O_2 и N_2 , что свидетельствует о некотором повышении полноты реакций окисления углерода и водорода. ОВТД из легких эфиров оказывают заметное влияние на снижение концентрации NO . Кинетические расчеты показали, что процесс сжигания Экибастузского угля (расход угля 10 кг/ч) полностью завершается в камере сгорания диаметром 0.2 и высотой 0.9 м. Выполнена серия из 52 экспериментов по совместному сжиганию высокозольного Экибастузского угля с органическими высокореакционными топливными добавками в специализированной камере сгорания. Комплекс численных и экспериментальных исследований сжигания высокозольного каменного угля в разработанной камере сгорания с расходом угля до 10 кг/ч позволил оценить эффективность топливных добавок Omstar-DX1 и Open Flame, представляющих собой смесь легких эфиров. Были выполнены сравнительные испытания сжигания угля без использования ОВТД и с использованием ОВТД при различных массовых отношениях ОВТД:уголь (0–5 мл на 1 кг угля). Эксперименты показали, что ОВТД повышают температуру факела на начальном участке камеры сгорания и снижают на ее выходе, что свидетельствует о более раннем воспламенении аэросмеси и, соответственно, более быстром ее выгорании. ОВТД Omstar-DX1 и Open flame существенно повышают эффективность сжигания низкосортного угля, снижая выбросы CO , NO , SO_2 и повышая концентрацию CO_2 , что свидетельствует об увеличении полноты сгорания топлива.

Ключевые слова: Уголь, горение, органические высокореакционные топливные добавки, расчет, эксперимент

Введение

В ближайшие 20 лет в связи с высокой долей твердых топлив в мировом производстве электрической энергии (28% в 2035 г. [1]) и наблюдающимся дефицитом электрической и тепловой энергии значительное внимание в мире уделяется повышению эффективности и экологической безопасности процессов сжигания твердых топлив на пылеугольных

тепловых электрических станциях, вырабатывающих более 40% электрической и тепловой энергии [2]. При этом наблюдается общемировая тенденция снижения качества энергетических углей, что приводит к увеличению использования не проектных топлив, т.е. углей с теплотехническими характеристиками, отличающимися от проектных. В связи с этим ухудшаются как технико-экономические, так и экологические показатели работы котлоагрегатов.

*Ответственный автор

E-mail: ust@physics.kz (В.Е. Мессерле).

© 2019 Институт проблем горения.
Издательство «Қазақ университеті»

По этой причине особую актуальность приобретает создание и применение новых технологий эффективного сжигания твердых топлив, независимо от их качества. Доля угля в запасах ископаемых топлив показана на рисунке 1. По сравнению с другими ископаемыми топливами, запасы угля приблизительно в четыре раза превышают запасы нефти (оценочно на 41 год) или запасов газа (на 67 лет) [3]. Мировая энергетика в настоящее время и на обозримую перспективу ориентирована на использование органического топлива, главным образом низкосортных углей. Следует отметить, что ухудшение качества энергетических углей наблюдается повсеместно, и не только в странах СНГ, но и в развитых капиталистических странах. Несмотря на то, что за всю историю были подъемы и падения в активности использования угля, он и сейчас остается одним из важнейших топлив для выработки энергии, особенно электрической (рис. 2). В этой связи повышение эффективности сжигания твердых топлив с использованием существующих методов, включая топливные добавки, является острой проблемой энергетики.

Широко известен способ повышения эффективности использования моторных топлив и их октанового числа с использованием топливных добавок [4]. Например, в качестве добавки к бензину используется метил-трет-бутиловый эфир, которого только в России производится около 1 млн. тонн в год. Для повышения эффективности использования дизельного топлива применяют топливные добавки на основе спиртов и легких эфиров с плотностью 0.7–0.8 г/мл [5, 6].

Хотя объемы потребляемого угля в различных отраслях мировой экономики из года в год повышаются, а качество его снижается, использование топливных добавок для повышения эффективности сжигания угля мало изучено и практически не применяется [7]. С повышением количества сжигаемого угля увеличивается и интенсивное загрязнение окружающей среды экологически опасными химическими элементами, соединениями и веществами (оксиды азота, оксиды серы, углекислый газ и твердые частицы углерода), что делает применение топливных добавок к углю особенно актуальным. Для углей в настоящее время в качестве твердых добавок в основном применяют силанит, серпентин, железосодержащие кварциты, отходы металлообработки и другие. Топливные добавки – это химические элементы, соединения или вещества, вводимые непосредственно в сжигаемое топливо с целью экономии твердого топлива и улучшения его эксплуатационных, экологических и других характеристик в процессе его сжигания. Как правило, все твердые топливные добавки представляют собой минеральные вещества и имеют в своем составе SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO , MgO ,

MnO , K_2O , H_2O , OH . Механизм действия топливных добавок заключается в следующем. Топливные добавки, поступая в зону горения, нагреваются до высоких температур (1000–1300 °C и более). Под их воздействием межмолекулярные связи в добавке ослабевают и рвутся. В результате разрыва образуются химически активные атомы и радикалы, способствующие интенсификации процесса горения угля. Этот процесс сопровождается многочисленными микровзрывами и выделением дополнительной энергии, что визуально заметно по повышению светимости объема горения (эффект Ленарда). Вода, содержащаяся в составе добавки, интенсивно разлагается на атомарный водород (H), кислород (O) и гидроксил (OH), повышая реакционную способность топлива и активизируя процесс его горения. В результате действия добавок изменяются условия и механизм протекания всех физико-химических процессов, в том числе и окислительно-восстановительных реакций, выравнивается поле температур по всему объему горения, снижается потребность в необходимом для сжигания топлива воздухе, уменьшается количество продуктов неполного сгорания и соответственно увеличивается выход продуктов полного сгорания.

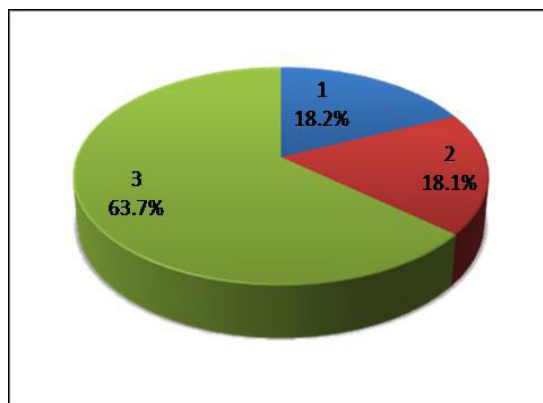


Рис. 1. Мировые разведанные запасы ископаемых топлив: 1 – нефть, 2 – газ, 3 – уголь [1].

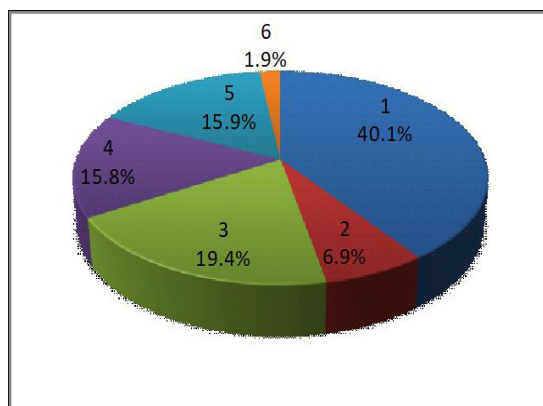


Рис. 2. Распределение энергоносителей по производству электроэнергии в мире: 1 – уголь; 2 – жидкое топливо; 3 – газ; 4 – атомная энергия; 5 – гидроэнергия; 6 – возобновляемые источники энергии. [2]

Применение минеральных топливных добавок к углю имеет и свои недостатки. Как правило, доля минеральных топливных добавок составляет 5-10% от массы угля, что увеличивает количество золы при сжигании угля с топливной добавкой. В состав золы входят как продукты сжигания угля, так и продукты термической трансформации минеральной топливной добавки. Также снижается теплотворная способность сжигаемой горючей смеси; увеличиваются затраты энергии на подготовку и ввод минеральной добавки.

В настоящей работе для устранения вышеуказанных недостатков применения минеральных топливных добавок к углю предлагается использовать органические высокорекреакционные топливные добавки (ОВТД) на основе жидких топлив, спиртов и эфиров. Учитывая более высокую реакционную способность последних, их доля может быть значительно ниже 0.5%.

Расчетная часть

Термодинамический расчет

Термодинамический анализ процесса сжигания угля был выполнен с использованием универсальной программы TERRA [8]. В отличие от традиционных в химической термодинамике методов расчета параметров равновесия с использованием энергии Гиббса, констант равновесия и закона действующих масс Гульдберга и Вааге, программа TERRA, базируется на принципе максимума энтропии для изолированных термодинамических систем, находящихся в состоянии равновесия. База данных программы TERRA содержит термодинамические свойства более 3000 индивидуальных веществ в интервале температур от 300 до 6000 К.

Выполнены термодинамические расчеты процесса сжигания Экибастузского каменного угля (таблица 1) с определением оптимальных температур и коэффициента избытка воздуха без ОВТД с целью последующего сравнения результатов сжигания угля с ОВТД.

Чтобы найти необходимое количество воздуха для полного сжигания высокозольного Экибастузского угля, процесс был рассчитан в температурном интервале от 600 до 2000 К при давлении 0.1 МПа с варьированием коэффициента избытка воздуха α от 4 до 8.

На рисунке 3 показано изменение состава газовой фазы продуктов сгорания Экибастузского угля при $\alpha = 6$ в зависимости от температуры процесса. Видно, что процесс интенсивного окисления углерода и водорода наблюдается во всем исследованном интервале температур. Концентрации основных компонентов (CO_2 , H_2O , N_2) практически не изменяются с ростом температуры. Поэтому о степени завершенности процесса горения угля можно судить по значениям концентраций монооксида углерода (CO) и водорода (H_2) при допустимых экологических показателях (концентрациях основных вредных выбросов – оксидов серы (SO_2) и азота (NO)). При температуре 1300 К ($\alpha = 6$), обеспечивающей устойчивое воспламенение угля, концентрация CO_2 составляет 16.96%, N_2 – 74.61%, H_2O – 6.4%. Концентрация монооксида углерода монотонно возрастает с температурой, достигая при 1300 К 1.7%. Концентрация водорода после прохождения максимума при 700 К снижается, составляя 0.37% при 1300 К. При этой температуре концентрация SO_2 составляет 1370 мг/м³ (670 ppm), а NO – $2 \cdot 10^{-4}$ мг/м³ ($8 \cdot 10^{-5}$ ppm), что меньше их предельно допустимых концентраций [9]. Концентрация компонентов, указываемая в мг/м³, относится к стандартным условиям (давление – 1 атм., температура – 298 К). Концентрация метана (CH_4) резко снижается с температурой, уменьшаясь до 0.01% при $T = 750$ К. Концентрация сероводорода (H_2S) достигает максимума (0.07%) при $T = 1180$ К. С увеличением температуры H_2S диссоциирует на H_2 и серу (S), которые в дальнейшем окисляются до H_2O и SO_2 , соответственно. В дальнейшем сравнение различных вариантов расчета будет осуществляться для температуры 1300 К, соответствующей ее минимальному значению для обеспечения устойчивости горения угля при его факельном сжигании.

На рисунке 4 показано изменение состава газовой фазы продуктов сгорания угля при $\alpha = 7$ в зависимости от температуры процесса. Процесс интенсивного окисления углерода и водорода наблюдается также во всем исследованном интервале температур. Концентрации основных компонентов (CO_2 , H_2O , O_2 , N_2) практически не изменяются с ростом температуры. При температуре 1300 К концентрация SO_2 составляет 1618 мг/м³ (791 ppm), а NO – 241 мг/м³ (118 ppm), что по нормативам вредных выбросов (SO_2 и NO) находится в пределах ПДК. В отличие от предыдущего варианта, при $\alpha =$

Таблица 1

Химический состав Экибастузского каменного угля, масс. %

A ^c (%)	C	O ₂	H ₂	N ₂	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
40	48,86	6,56	3,05	0,8	0,73	23,09	13,8	2,15	0,34	0,31	0,16	0,15

Высшая теплота сгорания угля на сухую массу $Q_d = 16632$ кДж/кг, выход летучих $V_{daf} = 24\%$, влажность угля $W_w = 5.8\%$, A_d – зольность на сухую массу угля

7 в продуктах горения появляется свободный кислород (O_2) с концентрацией 1.94%. Концентрация CO_2 составляет 16.12%, N_2 – 75.87%, H_2O – 5.99%. CO появляется лишь при $T = 1700$ К, монотонно возрастая с температурой до 0.15% при 2000 К.

На рисунке 5 показано изменение состава газовой фазы продуктов сгорания угля при $\alpha = 8$ в зависимости от температуры процесса. Процесс интенсивного окисления углерода и водорода наблюдается также во всем исследованном интервале температур. Концентрации основных компонентов (CO_2 , H_2O , O_2 , N_2) практически не изменяются с ростом температуры. При температуре 1300 К концентрация SO_2 составляет 1268 мг/м³ (620 ppm), а NO – 177 мг/м³ (87 ppm), что по SO_2 находится в пределах ПДК. Свободный кислород (O_2) с концентрацией 4.26%. Концентрация CO_2 составляет 14.17%, N_2 – 76.23%, H_2O – 5.27%. CO появляется лишь при $T = 1760$ К, монотонно возрастая с температурой до 0.09% при 2000 К.

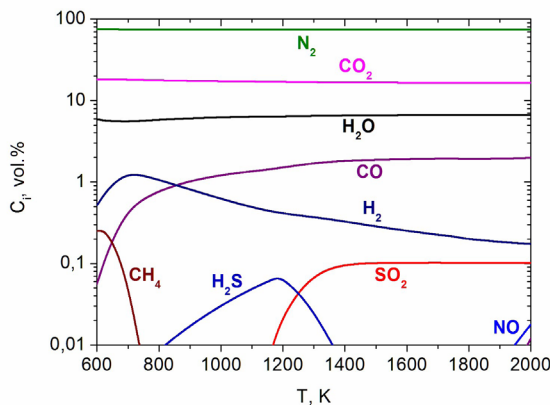


Рис. 3. Состав газовой фазы продуктов сгорания Экибастузского угля при $\alpha = 6$ в зависимости от температуры процесса.

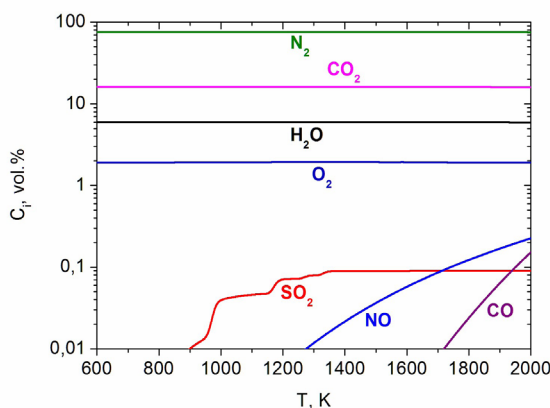


Рис. 4. Состав газовой фазы продуктов сгорания Экибастузского угля при $\alpha = 7$ в зависимости от температуры процесса.

На рисунке 6 показано изменение состава газовой фазы продуктов сгорания угля при различных коэффициентах избытка воздуха. Процесс интенсивного окисления углерода и водорода наблюдается во всем исследованном диапазоне коэффициентов избытка воздуха. Концентрации основных компонентов (CO_2 , H_2O , N_2) изменяются незначительно. Концентрации CO_2 , H_2O и N_2 при $\alpha = 6$ составляют 16.96, 6.4 и 74.61%, а при $\alpha = 7$ – 16.12, 5.99 и 75.87%, соответственно. Незначительное превышение концентраций CO_2 и H_2O при $\alpha = 6$ связано с более значительным разбавлением продуктов сгорания азотом при $\alpha = 7$. Концентрации конечных продуктов окисления углерода и водорода соответствуют их оптимальным концентрациям при факельном сжигании энергетических углей. Хотя максимальные концентрации CO_2 и H_2O наблюдаются при $\alpha = 6$, концентрации CO и H_2 при $\alpha = 6$ значительно превышают таковые при $\alpha = 7$, что свидетельствует о более полной завершенности процесса горения в последнем случае.

Таким образом, выполненные расчеты показали, что для сжигания 1 кг угля требуется 7 кг воздуха, а следовательно для сжигания угля оптимальным коэффициентом избытка воздуха является $\alpha = 7$. В этой связи расчеты процесса совместного сжигания угля с ОВТД выполнены при $\alpha = 7$. В расчетах использовано массовое отношение ОВТД: уголь, равное 0,005.

На рисунке 7 показано изменение состава газовой фазы продуктов сгорания угля с ОВТД в виде диизопропилового эфира ($C_6H_{14}O$) в зависимости от температуры процесса. Так же как и при сжигании угля без ОВТД (рис. 4), процесс горения углерода и водорода наблюдается во всем исследованном интервале температур. Концентрации основных компонентов (CO_2 , H_2O , O_2 , N_2) практически не изменяются с ростом температуры. При этом значения концентраций основных компонентов для

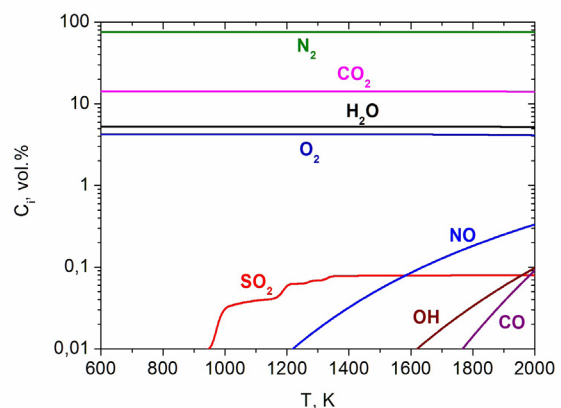


Рис. 5. Состав газовой фазы продуктов сгорания Экибастузского угля при $\alpha = 8$ в зависимости от температуры процесса.

двух вариантов расчета несколько различаются. В продуктах горения имеется свободный кислород с концентрацией 1.77% (1.94%), CO_2 с концентрацией 16.22% (16,12%), N_2 – 75.8% (75.87%), H_2O – 6.12% (5,99%). В скобках указаны значения концентраций компонентов продуктов сгорания угля без ОВТД. Итак, использование ОВТД приводит к незначительному снижению концентрации O_2 и повышению концентраций CO_2 и H_2O в продуктах сгорания угля. При температуре 1300 К концентрация SO_2 составляет 1618 мг/м³ (791 ppm), а NO – 231 мг/м³ (113 ppm), тогда как без ОВТД значения таковых составляли 1618 мг/м³ (791 ppm) и 241 мг/м³ (118 ppm), соответственно. Следовательно, концентрации SO_2 и NO находятся в пределах ПДК. CO также появляется лишь при $T = 1700$ К, монотонно возрастая с температурой до 0.16% при 2000 К.

На рисунке 8 обобщено влияние ОВТД на состав газовой фазы продуктов сгорания Экибастузского угля при температуре 1300 К в зависимости от разновидности добавляемых легких эфиров. Прослеживается тенденция повышения концентраций CO_2 , H_2O и соответствующего снижения концентрации O_2 , что свидетельствует о некотором повышении полноты реакций окисления углерода и водорода. Использование ОВТД способствует снижению концентрации оксида азота. Для ОВТД диизопропиловый эфир достигается максимальный экологический эффект: концентрация NO снижается на 4%. На концентрацию SO_2 применение ОВТД заметного влияния не оказывает.

Для определения динамических характеристик процесса и геометрических параметров специализированной камеры сгорания с системой плазменного запуска необходимо проведение кинетических расчетов процесса сжигания Экибастузского каменного угля с ОВТД.

Кинетический расчет

Кинетические расчеты процесса сжигания Экибастузского каменного угля были выполнены с помощью компьютерной программы Plasma-Coal [8]. Основу программы Plasma-Coal составляет одномерная модель, описывающая двухфазный (угольные частицы и газ-окислитель) химически реагирующий поток, распространяющийся в реакторе с внутренним тепловым источником. Кинетическая схема процесса сжигания угля состоит из 116 реакций, включающих реакции выделения летучих веществ из угля, гетерогенные реакции газификации углерода водяным паром, кислородом и диоксидом углерода, и радикальные реакции превращения первичных продуктов газификации в газовой фазе.

Целью расчетов по программе Plasma-Coal было определение геометрических размеров специализированной камеры сгорания, а также температу-

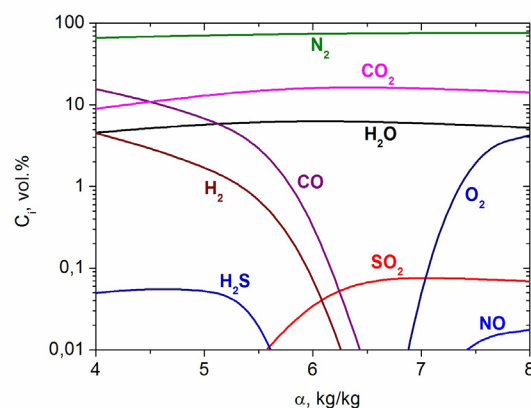


Рис. 6. Состав газовой фазы продуктов сгорания Экибастузского угля при $T = 1300$ К в зависимости от избытка воздуха.

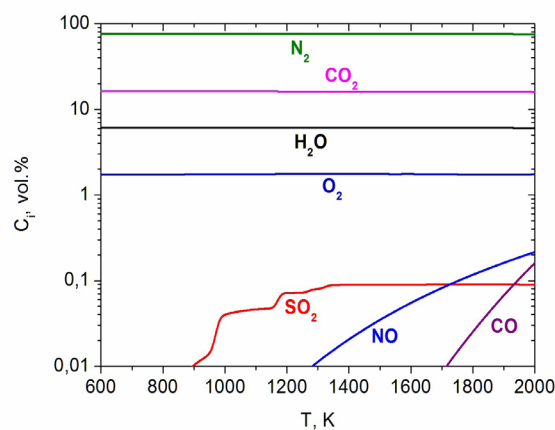


Рис. 7. Состав газовой фазы продуктов сгорания Экибастузского угля с добавкой диизопропилового эфира в зависимости от температуры процесса.

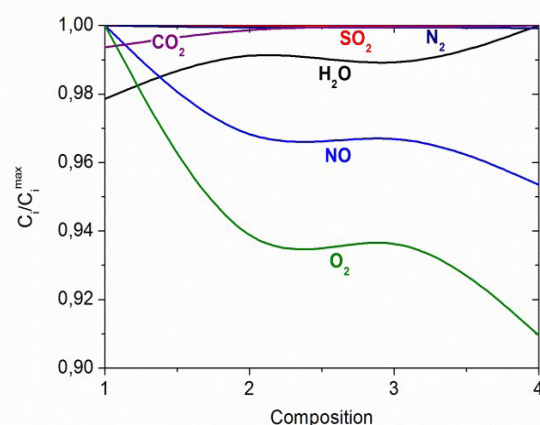


Рис. 8. Изменение относительных концентраций компонентов газообразных продуктов сгорания Экибастузского угля при температуре 1300 К в зависимости от разновидности добавляемого эфира: по оси абсцисс: 1 – без добавки; 2 – добавка тетрагидрофурана ($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$); 3 – добавка фурфурола ($\text{C}_5\text{H}_4\text{O}_2$); 4 – добавка диизопропилового эфира ($\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$).

ры стенки камеры, при которой обеспечивается воспламенение и полное сжигание Экибастузского угля.

Результаты расчетов, выполненных при различных температурах стенки реактора, показали, что для обеспечения стабильного сгорания угля, температура стенки камеры сгорания должна составлять 1000 К. В расчетах было принято, что размер угольных частиц равен 75 мкм, что соответствует среднему размеру частиц пылеугольного топлива, сжигаемого на Алматинской ТЭЦ-3.

Внутренний диаметр камеры сгорания принят равным 0.2 м. В расчетах по кинетической модели коэффициент избытка воздуха равнялся 7, как было определено в выше приведенных термодинамических расчетах.

Как видно из рисунка 9, основными продуктами сжигания угля на выходе камеры сгорания (0.9 м) являются CO_2 , H_2O , N_2 , O_2 , концентрации которых составляют 14.8%, 5.4%, 78.2%, 1.4%, соответственно. В газовой фазе наблюдается бензол (C_6H_6) с незначительной концентрацией (0.15%), что связано с его устойчивостью к кислороду при относительно низкой температуре в камере сгорания. Расчет показал, что температура газовой фазы на выходе камеры сгорания составляет 1263 К, а скорость продуктов сгорания – 2.54 м/с. При этом время пребывания реагирующих веществ в камере сгорания составляет 0.43 сек, а степень конверсии углерода угля достигает 100%. Достигнутые параметры показывают завершенность сгорания угля в камере сгорания высотой 0.9 м.

Результаты термодинамических и кинетических расчетов по воспламенению и сжиганию Экибастузского угля позволили спроектировать и создать экспериментальную установку.

Для подтверждения выявленного выше положительного влияния ОВД на процесс сжигания низкосортного энергетического угля была выполнена серия сравнительных экспериментов по совместному сжиганию угля с ОВД и без нее.

Экспериментальная часть

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка по сжиганию угля (рис. 10) представляет собой цилиндрический реактор с системами электро- водо- газо- пылеснабжения. Установка включает в себя следующие основные узлы: реактор 1 (камера сгорания угля), плазматрон 2, камеру разделения газа и шлака 3, шлакоборник 4, камеры охлаждения отходящих газов 6, системы приготовления угольной пыли и его подачи 9, 10. Кроме того, для улавливания золы уносимой с газовым потоком, используется рукавный фильтр. Внутри камера сгорания футерована

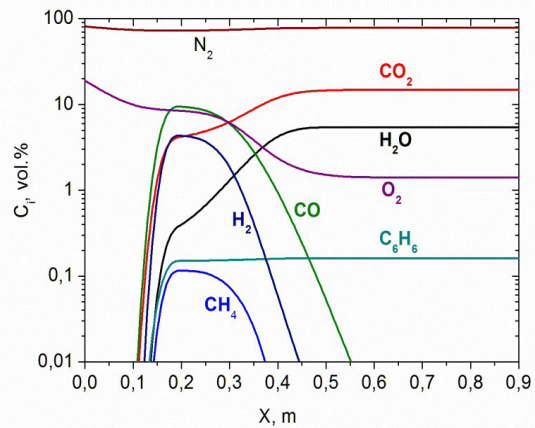


Рис. 9. Состав газовой фазы продуктов сгорания Экибастузского угля при $\alpha = 8$ в зависимости от температуры процесса.

огнеупорным кирпичом толщиной 0.06 м. Внутренний диаметр камеры составляет 0.2 м, а ее высота 0.9 м.

Для контроля работоспособности установки и определения интегральных показателей процесса таких, как среднемассовая температура, степень конверсии углерода угля, концентрации продуктов сгорания необходимы измерения составляющих материального и теплового баланса экспериментальной установки. Для контроля температуры внутри камеры сжигания используются четыре термодатчики, расположенные по высоте стенки камеры. Для измерения температуры продуктов сгорания на выходе камеры используется инфракрасный пирометр.

Нагрев стенок камеры осуществлялся с помощью электродугового плазматрона, мощностью 100 кВт. При достижении температуры внутренних стенок камеры 900 °С плазматрон отключался и в камеру сгорания через верхние патрубки подавался уголь и окислитель. В качестве окислителя использовалась смесь воздуха с кислородом, добавка которого была необходима для снижения расхода отходящих газов. Это связано с ограниченной производительностью вытяжного вентилятора. Полученный в процессе твердый остаток удалялся в шлакоборник, а газообразные продукты через камеру охлаждения выводились в вентиляционную систему. Отбор проб на газовый анализ продуктов сжигания угля осуществлялся непосредственно из камеры вывода отходящих газов 8 (рис. 10). Газовый анализ производился методом прямого измерения с помощью многокомпонентного газоанализатора «Полар Т».

Степень конверсии углерода угля ХС является одним из основных показателей эффективности процесса сжигания угля. Степень конверсии углерода рассчитывается через концентрацию углеро-

да в конденсированных продуктах сжигания угля. Концентрация углерода C подставляется в формулу, $X_C = (C_{\text{нач}} - C_{\text{кон}}) / C_{\text{нач}} \cdot 100\%$, где $C_{\text{нач}}$ и $C_{\text{кон}}$ – начальная и конечная концентрация углерода, соответственно.

Концентрация углерода в конденсированных продуктах сжигания угля определялась абсорбционно-весовым методом. Согласно этому методу образующийся при сжигании пробы диоксид углерода поглощается аскаритом (KOH или NaOH, нанесенные на асбест). Поглощение диоксида углерода протекает по реакции: $\text{CO}_2 + 2\text{NaOH} = \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$. Образующаяся при этом вода поглощается тем же абсорбционным веществом.

Схема устройства для определения концентрации углерода в конденсированных продуктах представлена на рисунке 11. После установки фарфоровой лодочки 2 в электропечь 3 и подключения абсорбционного патрона 6, кислород из баллона 9 подается через редуктор 7 и кран тонкой регулировки 8 в колбу 10 с 30% раствором KOH и поглотительную кювету 11 с концентрированной серной кислотой для предварительного осушения от влаги и следов диоксида углерода посредством барботажа. Затем осушенный кислород поступает в нагреваемую кварцевую трубку 1 и, проходя над фарфоровой лодочкой с исследуемым образцом, окисляет до диоксида углерода имеющийся в пробе углерод, нагретый до температуры 850–950 °С. После выхода из кварцевой трубки продукты сгорания попадают в трубку 5, заполненную сухим хромовым ангидридом (CrO_3), перемешанным с битым стеклом. Хромовый ангидрид необходим для

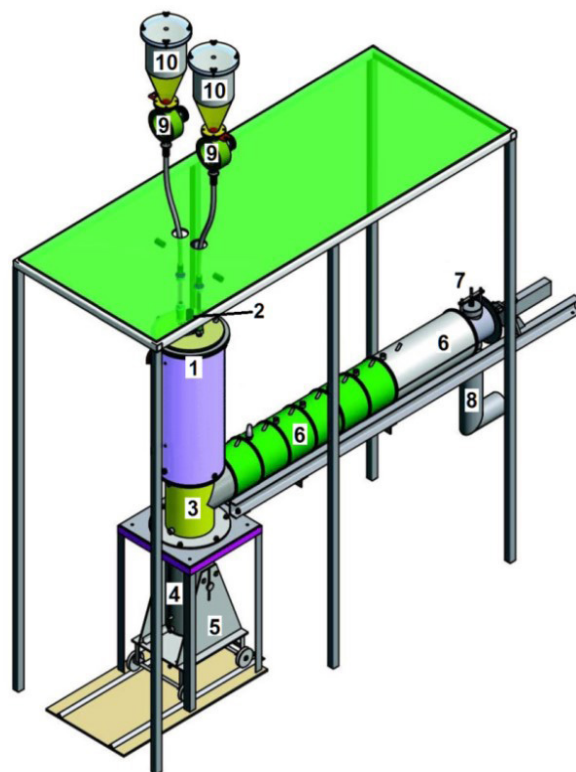


Рис. 10. Схема экспериментальной установки для сжигания угля: 1 – камера сгорания; 2 – плазмотрон/подача окислителя; 3 – камера разделения газа и шлака; 4 – шлакосборник; 5 – подъемник шлакосборника; 6 – камера охлаждения отходящих газов; 7 – предохранительный клапан; 8 – камера вывода отходящих газов; 9 – пылепитатель; 10 – бункер угольной пыли.

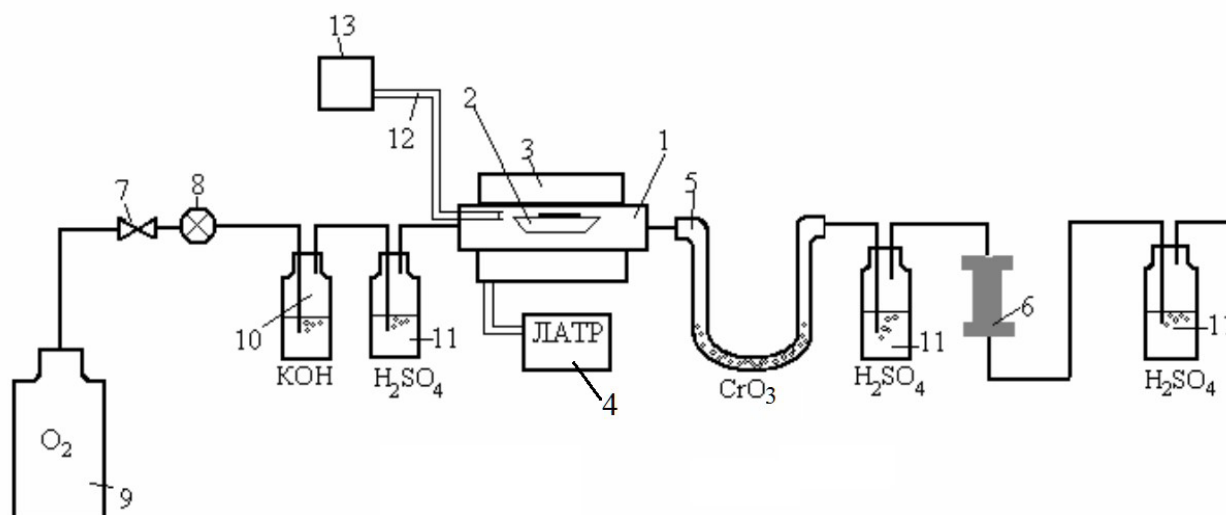


Рис. 11. Схема устройства для определения концентрации углерода в конденсированных продуктах: 1 – кварцевая трубка; 2 – фарфоровая лодочка; 3 – электропечь; 4 – лабораторный автотрансформатор; 5 – U-образная трубка с хромовым ангидридом (CrO_3) на стекле; 6 – абсорбционный патрон с аскаритом и ангидроном; 7 – кран; 8 – кран тонкой регулировки; 9 – газовый баллон; 10 – трубка с 30 % раствором едкого калия; 11 – газоочистные емкости с концентрированной H_2SO_4 ; 12 – термopара; 13 – регистрирующий прибор КСП-4 (компенсатор самопишущий потенциометрический).

доокисления следов SO_2 в SO_3 , который затем растворяется в газоочистной емкости 11, заполненной концентрированной серной кислотой. Трубка с хромовым ангидридом удерживает также оксиды железа, уносимые потоком кислорода из электропечи. Осушенный таким образом диоксид углерода попадает в абсорбционный патрон 6, состоящий из двух секций, заполненных аскаритом и ангидроном – $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$. На выходе абсорбционный патрон изолируется от атмосферы также с помощью газоочистной емкости, заполненной концентрированной серной кислотой.

Нагрев образцов в кварцевой трубке осуществляется с помощью электропечи 3, питаемой через лабораторный автотрансформатор 4. Ток и подаваемое напряжение печи регистрируются с помощью амперметра и вольтметра, включенных в цепь электропитания. Температура измеряется хромель-алюмелевой термопарой. Регистрация температуры осуществляется регистрирующим прибором 13. Навеска анализируемого материала, в зависимости от содержания в пробе углерода, в количестве 0,5-2,0 г, измеряемых на аналитических весах, загружается в фарфоровую лодочку 2 для сжигания. Лодочка устанавливается в середине кварцевой трубки 1, расположенной в электропечи 3. Абсорбционный патрон 6 предварительно взвешивается на аналитических весах. Анализируемый образец выдерживается в электропечи в течение 15–20 мин при температуре 850–950 °С. Затем электропечь выключается, абсорбционный патрон отсоединяется от устройства, охлаждается до комнатной температуры и взвешивается. Привес патрона соответствует количеству поглощенного диоксида углерода, который пересчитывается в количество углерода по формуле $C = 27.27 A/m$, где A – привес абсорбционного патрона в граммах, а m – навеска пробы в граммах. Найденная таким образом концентрация углерода подставляется в формулу для ХС.

Результаты экспериментов

В экспериментах была использована пыль промышленного помола Экибастузского каменного угля (таблица 1). Предварительный рассев угольной пыли показал, что средний размер угольных частиц составляет 75 мкм.

Для определения эффективности сжигания угля за 6 месяцев было проведено 28 наладочных экспериментов и 26 серийных сравнительных испытаний сжигания угля без использования ОБТД и с использованием ОБТД Omstar-DX1 и Open Flame с различным массовым отношением ОБТД : уголь (0–5 мл на 1 кг угля). ОБТД Omstar-DX1 и Open Flame представляют собой смеси легких эфиров [6]. В ходе экспериментов измерялись следующие

температуры: T_{wall1} – температура стенки, расположенной в зоне подачи угольной пыли и T_{wall2} – температура стенки, расположенной на выходе камеры сгорания. За время проведения экспериментов условия их проведения (давление, температура и влажность окружающей среды) могли изменяться, поэтому эксперименты с ОБТД и без ОБТД выполнялись за один непрерывный цикл. В этой связи остаточный углерод в конденсированных продуктах сжигания, отбираемых после завершения этого цикла и охлаждения установки, относился ко всем режимам сжигания угля. Определяемая по остаточному углероду степень конверсии угля являлась общей для одного цикла экспериментов.

В таблице 2 для сравнения приведены результаты испытаний сжигания Экибастузского угля без ОБТД и с ОБТД Omstar-DX1. Как видно из таблицы, использование ОБТД повышает на температуру стенок на начальном участке камеры сгорания на 168 и 194 градуса при добавке 2,5 и 5 мл на 1 кг угля, соответственно. В то же время температура стенки на выходе камеры сгорания уменьшается на 9 и 39 градусов, соответственно. Необходимо отметить, что концентрация CO_2 в отходящих газах соответствует нормативным показателям, принятым при сжигании угля на электростанциях. Результаты исследований показали, что использование ОБТД Omstar-DX1, при высокой степени конверсии углерода (ХС = 96,9%), способствует повышению температуры стенки камеры сгорания, а следовательно, и факела, и влияет на изменение всех измеряемых концентраций газообразных продуктов сгорания. При концентрации ОБТД 1,5 мл на 1 кг угля влияние на концентрации газообразных продуктов сгорания практически не проявляется. При концентрации добавки 2.5 мл на 1 кг угля зафиксировано незначительное снижение концентрации SO_2 (0.3%), тогда как концентрации NO и CO уменьшились значительно, на 43 и 91%, соответственно. Концентрация CO_2 возросла на 0,6%. При концентрации добавки 5 мл на 1 кг угля наблюдается подобная картина снижения концентраций SO_2 , NO и CO на 0,9, 50 и 92%, соответственно. Концентрация CO_2 также возросла на 1,3%. Значимое влияние на эффективность сжигания низкосортного угля ОБТД Omstar-DX1 начинает оказывать с 2,5 мл на 1 кг угля. Наибольшее влияние добавки на эффективность сжигания угля было зафиксировано при концентрации добавки Omstar-DX1 5 мл на 1 кг угля.

Для контрольных испытаний была выбрана концентрация добавки Open Flame 2.5 мл на 1 кг угля (таблица 3). Использование ОБТД Open Flame повышает на температуру стенок на начальном участке камеры сгорания на 64 градуса и понижает температуру стенок на выходе камеры сгорания на 110 градусов. При высокой степени конверсии углерода (ХС = 95,4%) зафиксировано снижение

концентраций SO_2 , NO и CO на 0.3, 47 и 54%, соответственно. Концентрация CO_2 возросла на 14.3%.

В рамках проведенных испытаний сжигания низкосортного угля обе добавки показали примерно одинаковую эффективность. Степень конверсии углерода (ХС), характеризующая полноту выгорания угля, достаточно высокая при использовании обеих ОВТД. ХС варьируется в интервале 95.4–96.9%.

В таблице 4 обобщены результаты экспериментов по эффективности использования ОВТД Omstar-DX1 и Open flame. Как видно из таблицы, обе ОВТД существенно повышают эффективность сжигания низкосортного угля: снижаются выбро-

сы CO , NO , SO_2 и повышается концентрация CO_2 , что свидетельствует об увеличении полноты сгорания угля.

Заключение

Термодинамические расчеты процесса сжигания Экибастузского угля показали, что для сжигания 1 кг угля требуется 7 кг воздуха. При использовании ОВТД прослеживается тенденция возрастания концентраций CO_2 , H_2O и соответствующего снижения концентраций O_2 и N_2 , что свидетельствует о некотором повышении полноты реак-

Таблица 2

Результаты экспериментов с ОВТД Omstar-DX1

$T_{wall}^1, ^\circ C$	$T_{wall}^2, ^\circ C$	Расход, кг/ч			Состав отходящих газов					$X_c, \%$
		уголь	воздух	O_2	SO_2	NO	CO	CO_2	N_2	
					мг/м ³					Об.%
Без ОВТД										
979	1124	9.57	20.3	11.4	1120	552	689	15.7	77.0	96.9
ОВТД – 1,5 мл на 1 кг угля										
1054	1120	9.6	20.3	11.4	1119	535	664	15.7	77.0	96.9
ОВТД – 2,5 мл на 1 кг угля										
1147	1115	9.61	20.3	11.4	1117	315	64	15.8	76.9	96.9
ОВТД – 5 мл на 1 кг угля										
1173	1085	9.63	20.3	11.4	1110	274	53	15.9	76.8	96.9

Таблица 3

Результаты экспериментов с ОВТД Open flame

$T_{wall}^1, ^\circ C$	$T_{wall}^2, ^\circ C$	Расход, кг/ч			Состав отходящих газов					$X_c, \%$
		уголь	воздух	O_2	SO_2	NO	CO	CO_2	N_2	
					мг/м ³					Об.%
Без ОВТД										
1076	1225	9.66	20.3	11.4	1109	518	520	11.9	87.6	95.4
ОВТД – 2,5 мл на 1 кг угля										
1140	1115	9.66	20.3	11.4	1106	276	237	13.6	86.2	95.4

Таблица 4

Основные показатели эффективности использования ОВТД при сжигании Экибастузского угля

ОВТД Open flame – 2,5 мл на 1 кг угля	
Снижение NO на 47%	Снижение CO на 54%
Снижение SO_2 на 0.3%	Увеличение CO_2 на 14.3%
Omstar-DX1 – 5 мл на 1 кг угля	
Снижение NO на 50%	Снижение CO на 92%
Снижение SO_2 на 0.9%	Увеличение CO_2 на 1.3%

ций окисления углерода и водорода. ОВТД из легких эфиров оказывают заметное влияние на снижение концентрации NO.

Кинетические расчеты показали, что процесс сгорания Экибастузского угля полностью завершается в камере сгорания диаметром 0.2 и высотой 0.9 м.

В процессе испытаний была проведена серия из 52 экспериментов по сжиганию угля без использования ОВТД и с использованием ОВТД при различных массовых отношениях ОВТД : уголь (0–5 мл на 1 кг угля). Эксперименты показали, что ОВТД повышают температуру факела на начальном участке камеры сгорания и снижают на ее выходе, что свидетельствует о более раннем воспламенении аэросмеси и, соответственно, более быстром ее выгорании. ОВТД Omstar-DX1 и Open flame существенно повышают эффективность сжигания низкосортного угля, снижая выбросы CO, NO, SO₂ и повышая концентрацию CO₂, что свидетельствует об увеличении полноты сгорания топлива.

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.
- [4]. Мусабеков М.О., Мусабекова А.М. Оценка влияния спиртовых присадок на процессы термохимических превращений топлив в энергоустановках // Энергия будущего: инновационные сценарии и методы их реализации: материалы Всемирного Конгресса инженеров и ученых (19-20 июня, 2017, Астана, Казахстан). Под общ. ред. акад. Н.А. Абыкаева, Б.Т. Жумагулова. – Т.3. – Алматы, 2017. – С.257-258.
- [5]. Morton Z. Fainman. Fuel Additive. USA Patent #4920691, May 1, 1990
- [6]. Е. Дубровин, И. Дубровин. Использование присадок к угольному топливу // Газета «Энергетика и промышленность России». – № 21 (257). – 2014 года. – Новые технологии. <http://www.eprussia.ru/epr/257/16522.htm>
- [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 Energy Institute. – 2005. – 78 (4). – P. 157–171.
- [8]. Характеристика продуктов сгорания выбрасываемых котельными в атмосферу. Энциклопедия теплоснабжения.

Improving the efficiency of burning solid fuels using organic highly reactive additives

V.E. Messerle¹, A.L. Mosse², G. Paskalov³, K.A. Umbetkaliev¹, A.B. Ustimenko⁴

¹Institute of Combustion Problems, Almaty, Kazakhstan

²A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute, NAS of Belarus, Minsk, Belarus

³Three Hats LLC, Nevada, USA

⁴Plasmatechnics R&D LLC, Institute of Experimental and Theoretical Physics, al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

ABSTRACT

This paper presents the results of computational and experimental studies of the effect of organic highly reactive fuel additives on the combustion efficiency of high-ash thermal coal, including the environmental indicators of the process. A technical solution is proposed for the development of the technology of co-combustion of solid fuels with organic highly reactive additives (OHRA) and the creation of a specialized combustion chamber with a plasma launch system. The thermodynamic analysis and kinetic calculation of the process of co-combustion of solid fuels with OHRA were performed, on the basis of which the optimum process temperatures, air excess factor and geometric parameters of the combustion chamber were selected. Thermodynamic calculations of Ekibastuzski coal combustion showed that 7 kg of air is required for burning 1 kg of coal. With the use of OHRA, there was a tendency to increase the concentrations of CO₂, H₂O in the combustion products of coal and a corresponding decrease in the concentrations of O₂ and N₂, which indicates a slight increase in the completeness of the oxidation of carbon and hydrogen. OHRA from light ethers have a slight effect on reducing the concentration of NO. Kinetic calculations showed that the combustion process of Ekibastuzski coal (coal consumption 10 kg/h) is fully completed in a combustion chamber with a diameter of 0.2 and a height of 0.9 m. A series of 52 experiments on the co-combustion of high-ash Ekibastuzski coal with organic highly reactive fuel additives in a specialized combustion chamber was carried out. A complex of numerical and experimental studies of the combustion of high-ash hard coal in the developed combustion chamber with coal consumption up to 10 kg/h made it possible to evaluate the effectiveness of the additives Omstar-DX1 and Open Flame, which are a mixture of light esters. Comparative tests of burning coal without the use of OHRA and using OHRA with different weight ratios OHRA : coal (0–5 ml per 1 kg of coal) were performed. Experiments have shown that OHRA raise the temperature of the flame in the initial section of the combustion chamber and reduce it at the exit, which indicates an earlier ignition

of the air mixture and, accordingly, more rapid burnout. Additives Omstar-DX1 and Open Flame significantly increase the efficiency of burning low-grade coal, reducing emissions of CO, NO, SO₂ and increasing the concentration of CO₂, indicating an increase in the completeness of combustion of fuel.

Key words: Coal, combustion, organic high reactive fuel additives, computation, experiment

Органикалық жоғары реакциялық қоспаларды қолдану арқылы қатты отындардың жану тиімділігін арттыру

¹Жану проблемар институты, Алматы, Қазақстан

²Беларусь ҰҒА-ның А.В. Лыков атындағы Жылу- және массаалмасу институты, Минск, Беларусь

³ЖШС «Plasma Microsystems», Калифорния, АҚШ

⁴ЖШС «Плазматехника R&D», Эл-Фараби атындағы ҚазҰУ-ның Эксперименталды және теоретикалық физика ҒЗИ, Алматы, Қазақстан

АНДАТПА

Бұл мақалада жоғарыкүлділі энергетикалық көмірдің өрттеу тиімділігіне органикалық жоғарыреактивті жанармай қоспалардың әсері, соңымен қатар үрдістің экологиялық көрсеткіштерді қосқанда есептеу мен эксперименталды зерттеулердің нәтижелері көрсетілген. Қатты отындарды органикалық жоғарыреактивті жанармай қоспалармен (ОЖЖҚ) бірге өрттеудің технологиясын жасақтау және плазмалық іске қосу жүйесі бар арнайы жану камерасын құрастыру үшін техникалық шешім ұсынылған. Қатты отындарды ОЖЖҚ-мен біріккен өртеу үдерісінің термодинамикалық талдауы мен кинетикалық есептеулер орындалған, оның нәтижесінде үдерістің үйлесімді температуралар, ауаның артықтығы коэффициенті және арнайы жану камерасының геометриялық параметрлері анықталған. Екібастұз көмірдің өртеу үрдістің термодинамикалық есептеулер нәтижесінде 1 кг көмірді өртеу үшін 7 кг ауа қажет екенін көрсетті.

ОЖЖҚ пайдалану кезінде көмірдің жану өнімдерінде CO₂, H₂O жоғарылауы және сәйкесінше O₂ және N₂ концентрациясының төмендеуі анықталды, бұл көміртегі мен сутегінің тотығу реакциялардың толықтығын көрсетеді. Жеңіл эфирлерден алынған ОЖЖҚ NO концентрациясын төмендетуге айтарлықтай әсер етеді. Кинетикалық есептеулер Екібастұз көмірінің жану процесі (көмірдің шығыны 10 кг/сағ) диаметрі 0,2 және биіктігі 0,9 м жану камерасында толығымен аяқталғанын көрсетті. Арнайы жану камерасында органикалық жоғарыреактивті жанармай қоспалары және жоғарыкүлділі Екібастұз көмірді біріккен өртеудің 52 тәжірибе орындалған. Көмір шығыны 10 кг/сағ дейін және ауаның шығаратын жану камерасында жоғарыкүлділі тас көмірдің өртенуі есептеу және эксперименттік зерттеулер кешені жеңіл эфирлердің қоспасы болып табылатын Omstar-DX1 және Open Flame отын қоспаларының тиімділігін бағалауға мүмкіндік берді. Көмірді өртеудің салыстырмалы сынақтары орындалған, қоспасыз және қоспамен әртүрлі массалық қатынасы бойынша қоспа : көмір (1 кг көмірге 0-5 мл қоспа). Тәжірибе көрсеткендей, ОЖЖҚ жану камерасының бастапқы бөлігіндегі алаудың температурасын көтереді және оны шығару кезінде азайтады, ол ауа қоспасының ертерек өртілуін және тиісінше, тез күйіп кеткенін көрсетеді. Omstar-DX1 және Open Flame қоспалары көмірді жағудың тиімділігін айтарлықтай арттырады, CO, NO, SO₂ шығарындыларын азайтады және CO₂ концентрациясын арттырады, бұл жанармай жануының толықтығын көрсетеді.

Түйінді сөздер: Көмір, жану, органикалық жоғарыреактивті жанармай қоспалар, есептеу, эксперимент.