

Эффективность плазменной технологии подготовки твердых топлив к сжиганию

В.Е. Мессерле, М.Н. Орынбасар, А.Б. Устименко*

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

АННОТАЦИЯ

Выполнен термодинамический анализ, позволивший найти рабочие параметры плазменной технологии подготовки твердых топлив к сжиганию. Кинетические расчеты плазменного воспламенения и устойчивого сжигания пылеугольного факела выполнены с использованием программы PlasmaKinTherm. Получены профили температур, скоростей и концентраций горючего газа и угольных частиц по длине реакционной зоны плазменно-угольной горелки. В экспериментах по плазменной подготовке энергетического угля к сжиганию достигнуто устойчивое воспламенение пылеугольного факела, измерены температура и состав полученного высокорекреационного двухкомпонентного топлива, а также определена степень конверсии углерода высокосолевого Экибастузского угля. Сопоставление результатов экспериментов и расчетов показало их приемлемое согласие. Показано, что основным продуктом плазменного воспламенения и стабилизации горения угля является высокорекреационное двухкомпонентное топливо, а концентрации вредных выбросов – оксидов азота и серы при этом меньше, чем в дымовых газах тепловых электростанций на два порядка.

Ключевые слова: плазменная подготовка к сжиганию, твердое топливо, горючее двухфазное топливо, плазменно-угольная горелка, численное исследование, эксперимент

1. Введение

Современная жизнь немыслима без использования электроэнергии, самым распространенным источником которой в мире является уголь, обеспечивающий более 36,4% мировой выработки электроэнергии [1]. Например, пылеугольные тепловые электростанции (ТЭС) производят 25% электроэнергии в США, 30% – в России, 50% – в Индии и по 85% – в Китае и Казахстане. Угольные ТЭС обеспечивают доступную и надежную мощность, необходимую для удовлетворения потребностей потребителей энергии во всем мире. Поскольку большая часть мира не имеет доступа к современным экологически чистым источникам энергии, уголь по-прежнему имеет важное значение для борьбы с дефицитом энергии, так как его запасы в мире распределены более равномерно, значительно превышая таковые нефти и газа (рис.1).

Уголь является ключом к сокращению энергетической бедности. Около 2,6 миллиарда человек по всему миру в настоящее время живут без доступа к электроэнергии [2]. Ежегодно 1,5 миллиона человек в мире умирает от причин, вызванных бытовым загрязнением от сжигания древесины и навоза, а также отсутствия элементарных санитарных условий [3].

Очевидно, что уголь нельзя просто исключить из энергетического баланса. Все виды топлива и технологии необходимы для решения многих актуальных проблем. Мир по-прежнему нуждается в угле, являющемся не только доступным на многих рынках энергоносителем, но и остающемся единственным жизнеспособным ресурсом для важнейших отраслей промышленности. Уголь также играет важнейшую роль в создании инфраструктуры для возобновляемых источников энергии и поддержке их функционирования. Помимо энергетики, уголь также используется в других отраслях промышленности, таких как металлургия и производство фосфорных удобрений, использующих коксующийся уголь, цементная промышленность. Уголь и его побочные продукты

**Ответственный автор*
E-mail: ust@physics.kz

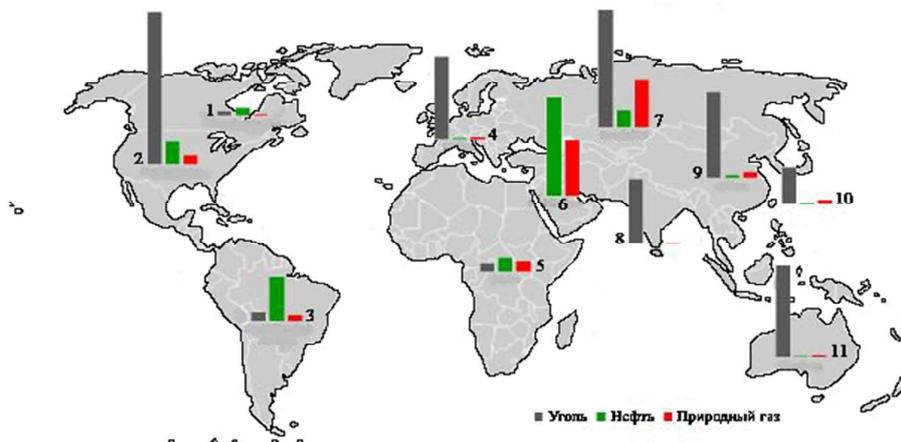


Рис. 1. Распределение запасов ископаемых топлив в мире: 1 – Канада и Мексика; 2 – США; 3 – Южная и Центральная Америка; 4 – Европа; 5 – Африка; 6 – Средний Восток; 7 – Россия и СНГ; 8 – Индия; 9 – Китай; 10 – Азиатско-Тихоокеанский регион; 11 – Австралия.

также используются для производства различных товаров, включая активированный уголь, применяемый в фильтрах для систем очистки воды и воздуха, углеродное волокно в конструкции самолетов и автомобилей, металлический кремний для смазочных материалов и даже химических процессов для извлечения редкоземельных элементов, и это лишь несколько примеров.

В этой связи основной задачей развития угольной энергетики является разработка новых технологий, повышающих эколого-энергетическую эффективность использования твердых топлив. Одной из таких технологий является безмазутное плазменное воспламенение, стабилизация горения и сжигание твердых топлив с термохимической подготовкой твердого топлива к сжиганию в плазменно-топливной системе (ПТС) [4-9]. Использование термохимической подготовки твердого топлива к сжиганию в ПТС позволяет полностью исключить топочный мазут (или природный газ), применяемых для запуска котлов и подсветки пылеугольного факела. Технология плазменного воспламенения и стабилизации го-

рения (ПВСГ) включает нагрев смеси угольной пыли и воздуха (аэросмеси) плазменным факелом для выделения летучих соединений угля и частичной газификации углерода твердого остатка. В результате этого процесса на выходе ПТС из исходной аэросмеси образуется высокорекреационное двухкомпонентное топливо (ВДТ), состоящее из двух фаз: горючего газа и активированного коксового остатка. При смешении с вторичным воздухом в топочной камере высокотемпературное ВДТ самовоспламеняется и стабильно горит в топочном объеме без сжигания жидкого или газообразного высокорекреационного топлива. Схема прямоточной ПТС показана на рис. 2.

Для проектирования ПТС необходимо использование физических и математических моделей сложных процессов тепломассопереноса и термохимических превращений топлива и окислителя в ПТС. При моделировании плазменных процессов используются различные программы численных расчетов. Например, в работе [10] с использованием комплекса Chemical WorkBench ver.3.5 выполнены термодинамические расчеты плазменной газификации углеродсодержащих материалов (УМ) с получением синтез-газа. Изучен состав синтез-газа в зависимости от температуры в диапазоне 650-1500 К и массового соотношения пар:УМ в диапазоне 0,8-3,1 кг/кг при давлении 1-7 атм. Показано, что при плазменной газификации 1 кг УМ получается 4,2 Нм³ синтез-газа (Н₂ – 60,3 и СО – 39,0 об.%). В работе [11] термодинамическим методом изучен процесс получения синтез-газа с помощью плазменной газификации УМ в различных газифицирующих агентах (воздух, пар, кислород). Показано, что

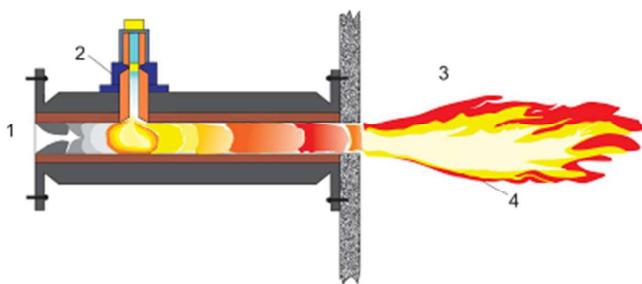


Рис. 2. Прямоточная ПТС: 1 – аэросмесь; 2 – плазматрон; 3 – топка котла; 4 – высокотемпературный факел ВДТ.

при паровоздушной газификации увеличиваются концентрации водорода и оксида углерода, а концентрации конденсированного углерода уменьшаются. В статье [12] представлен термодинамический расчет комбинированной плазменной паровоздушной газификации УМ и бурого угля. Показана возможность получения синтез-газа с содержанием оксида углерода и водорода 44,3 и 29,5 об.% соответственно. Удельные энергозатраты на процесс составили 1,34 кВт·ч/кг. В работе [13] предложены математическая модель термодинамических расчетов и созданная на ее основе универсальная программа TERRA. Эта программа прошла верификацию при расчетах плазменной газификации и термохимической подготовки твердых топлив к сжиганию [4-6, 13]. Кроме того, данная программа обладает собственной базой данных, необходимых для расчетов плазменных процессов топливоиспользования, и удобным для пользователей интерфейсом. Кинетическая программа PlasmaKinTherm, выбранная для проведения численного анализа в данной статье, основана на математических моделях программ TERRA и Plasma-Coal [7, 11]. Она также была верифицирована на экспериментальной ПТС производительностью по твердому топливу до 2000 кг/ч.

В настоящей работе приведены расчетные и опытные данные, посвященные решению задачи использования технологии ПВСГ на ТЭС для повышения эколого-энергетической эффективности топливоиспользования. Результаты численного моделирования с использованием термодинамической и кинетической моделей сопоставлены с экспериментом.

2. Материалы и методы

2.1. Материалы

Для исследования ПВСГ с получением ВДТ использовали Экибастузский энергетический каменный уголь (табл. 1) с оптимальной концентрацией

угольной пыли в аэросмеси 0,7 кг/кг (1000 кг угля + 1429 кг воздуха) в температурном диапазоне 300-2000 К при атмосферном давлении (0,101 МПа) [14]. Из таблицы 1 видно, что при теплоте сгорания угля 16700 кДж/кг зольность угля составляет 40%, влажность – 5,8%, а выход летучих – 24%. Температура размягчения золы Экибастузского угля $t_3=1250$ °С.

Фракционный состав угля, определенный ситовым анализом угольной пыли, приведен в таблице 2. Исходя из результатов ситового анализа, средний диаметр угольных частиц составил 60 мкм.

2.2. Метод термодинамического моделирования

Термодинамический анализ процесса ПВСГ, в основе которого лежит электро-термохимическая подготовка угля к сжиганию, выполняли с применением универсальной программы термодинамических расчетов TERRA [13]. В основе программы TERRA лежит принцип максимальной энтропии в замкнутых равновесных термодинамических системах. Банк программы TERRA включает термодинамические свойства около 3000 веществ в диапазоне температур 300-6000 К. При этом выявлены критерии устойчивого воспламенения полученного в результате ПВСГ ВДТ: концентрация горючих газов ($CO+H_2+CH_4$) – более 15% и температура, достаточная для самовоспламенения ВДТ, – >1073 К.

2.3. Метод кинетического моделирования

Термодинамическое моделирование позволяет определить состав ВДТ и степень газификации углерода в зависимости от температуры процесса ПВСГ, но не позволяет получить полную картину теплового и кинетического взаимодействия реагентов двухфазного потока с плазменным источником в объеме ПТС, поскольку не оперирует такими важными критериями, как время протекания

Таблица 1. Технические характеристики и состав Экибастузского угля, мас.%

Технические характеристики		Химический состав			
Влажность на рабочую массу	5,8	H	3,05	SiO ₂	23,09
Выход летучих на горючую массу	24,0	C	48,86	Al ₂ O ₃	13,8
Фиксированный углерод	30,2	S	0,73	Fe ₂ O ₃	2,15
Зольность на сухую массу	40,0	N	0,8	CaO	0,34
Всего	100,0	O	6,56	MgO	0,31
Высшая теплота сгорания на сухую массу угля, кДж/кг	16700,0	Зольность	40,0	K ₂ O	0,16
		Всего	100,0	Na ₂ O	0,15
				Зольность	40,0

Таблица 2. Фракционный состав Экибастузского угля

Фракция	Диаметр частиц, мкм	Доля фракции, мас. %
1	10	10
2	30	20
3	60	40
4	100	20
5	120	10

процесса и время пребывания реагентов в ПТС. Это не позволяет определить конфигурацию и размеры ПТС для осуществления процесса ПВСГ. В этой связи в настоящем разделе выполнено кинетическое моделирование процесса ПВСГ в ПТС по программе PlasmaKinTherm [14]. Теплофизические и термодинамические коэффициенты (вязкость, теплопроводность, теплоемкость, экзотермические и эндотермические эффекты реакций термохимических превращений компонентов) потока реагентов, концентрация пыли в аэросмеси и мощность плазменного источника ПТС, необходимые для проведения кинетических расчетов, были найдены с использованием программы TERRA.

Программа PlasmaKinTherm основана на математических моделях программ TERRA и Plasma-Coal [13]. В ней объединены кинетическая схема выхода летучих соединений угля и окисления углерода и термодинамический метод расчета газофазных термохимических реакций образовавшихся из угля продуктов с окислителем. В модели рассматривается двухфазный химически реагирующий поток угольных частиц и воздуха, распространяющийся в плазменно-угольной горелке. Равномерно перемешанные с газом частицы поступают в ПТС (рис. 2). Газ нагревается плазменным факелом и нагревает частицы, из которых при нагреве начинают выделяться летучие вещества в газовую фазу согласно кинетической схеме процесса [13]. Процесс в ПТС считается квазистационарным и одномерным, мелкодисперсные угольные частицы – изотермическими, а минеральная масса (зола) является инертным веществом. Предполагается также, что частицы не взаимодействуют друг с другом. Взаимодействие пылеугольной смеси с плазмой рассматривается как нагрев пылеугольного топлива потоком высокотемпературного газа. Состав угля в модели представлен его органической и минеральной массами. Органическая масса угля представле-

на набором летучих веществ (CH_4 , C_6H_6 , CO , H_2 , H_2O , CO_2) и углеродом. Процесс выделения летучих соединений определяется кинетикой нагрева угольных частиц. Выделившиеся в газовую фазу летучие вещества смешиваются и реагируют с потоком высокотемпературного газа. Для расчета реакций в газовой фазе используется модель локального термодинамического равновесия, реализованная с помощью программы TERRA [13]. Такой подход позволил совместить кинетический механизм выделения летучих веществ и окисления углерода угля с термодинамическим методом расчета высокотемпературных термохимических превращений первичных продуктов деструкции угля в газовой фазе.

2.4. Метод экспериментального исследования

Экспериментальные исследования процесса ПВСГ проводились в прямоточной ПТС (рис. 3). Плазмотрон устанавливается на начальном участке футерованной цилиндрической камеры ПВСГ. Аэросмесь образуется при смешении угольной пыли, поступающей из бункера, и воздуха, подаваемого центробежным вентилятором, обеспечивающим скорость воздуха в канале ПТС 15 м/с. Поступающая в ПТС аэросмесь взаимодействует с плазменным воздушным факелом, выходящим из сопла – анода плазмотрона. Плазмообразующий воздух подается в межэлектродное пространство, нагревается до высоких температур, образуя на выходе из плазмотрона плазменный факел, температура которого на срезе анода достигает 5000 К [15]. Эксперименты проводились на прямоточной ПТС диаметром 0.15 м и длиной 3 м. Использовался плазмотрон номинальной электрической мощностью 100 кВт. Для экспериментов использовался Экибастузский каменный уголь (табл. 1). Фракционный состав угля, определенный ситовым анализом угольной пыли, был представлен в таблице 2. Температура аэросмеси составляла 300 К, расход угля через ПТС 1000 кг/ч, а воздуха – 1430 кг/ч. Эксперименты проводились при мощности плазмотрона 70 кВт, что, с учетом его КПД 85%, составляло 60 кВт выделившейся в объеме ПТС мощности.

Температуру факела измеряли с помощью цифрового пирометра Ircan Ultrimax Plus UX10P, предназначенного для определения температуры в диапазоне 600-3000 °С. Погрешность зависит от измеряемого интервала температур. При температуре ниже 1500 °С относительная погрешность равна ±0,5%. В интервале температур 1500-2000 °С погрешность составляет ±1%, а при темпера-

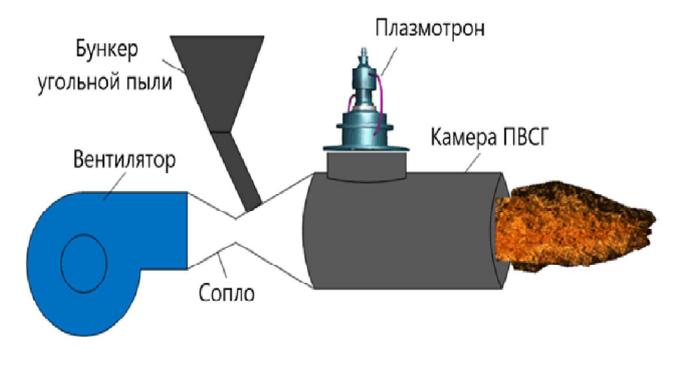


Рис. 3. Экспериментальная прямооточная ПТС.

туре выше 2000 °С она увеличивается до $\pm 2\%$. Чувствительность пирометра – 1 °С. Температуру факела ВДТ, измеренную в процессе стендовых испытаний ПТС, варьировали в интервале 1150–1180 °С, что обеспечивало устойчивое воспламенение и горение факела ВДТ при его смешении с воздухом, даже в случае воспламенения высокозольного Экибастузского угля. Отбор проб на газовый анализ производили с помощью специализированного термостойкого зонда. Схема отбора проб показана на рисунке 4. Отбор проб газа осуществляли следующим образом. После включения центробежного вентилятора 2 на заданный расход воздуха и плазмотрона 1 из бункера 3 подавали угольную пыль с расходом, обеспечивающим ее необходимую концентрацию в аэросмеси, после чего на выходе ПТС образовывался факел ВДТ. Зонд, представляющий собой трубку из нержавеющей стали диаметром 5 мм, фиксировали на срезе ПТС в объеме факела ВДТ. Затем шприцом для отбора газов 6 засасывали необходимый объем газа через высокотемпературный фильтр

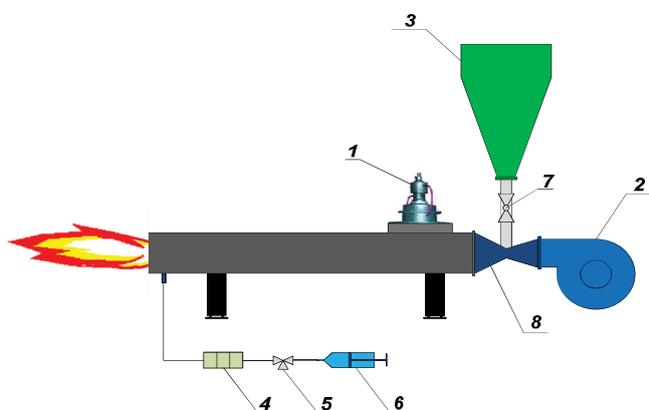


Рис. 4. Схема отбора отходящих газов из ПТС: 1 – плазмотрон; 2 – центробежный вентилятор; 3 – бункер пыли; 4 – высокотемпературный фильтр со сменным наполнителем из супертонкого базальтового волокна; 5 – трехходовой кран; 6 – шприц для отбора газов; 7 – запорная арматура; 8 диффузор.

4 со сменным наполнителем из супертонкого базальтового волокна и открытый трехходовой кран 5. Шприц с отобранной пробой подключали к газовому хроматографу «Хроматэк-Газохром-2000» для определения состава газа.

Важным преимуществом технологии ПТС является отсутствие шлакования внутренних поверхностей ПТС, которое достигается выдерживанием концентрации угольной пыли в аэросмеси 0,7 кг/кг, что исключает процесс горения топлива в объеме ПТС и ограничивает температуру процесса ПВСГ ниже температуры размягчения золы угля, в данном случае Экибастузского. Твердый остаток для определения содержания остаточного углерода и степени его газификации отбирали из высокотемпературного фильтра со сменным наполнителем 4 (рис. 4). Долю углерода в конденсированных продуктах ПВСГ определяли абсорбционным весовым методом.

3. Результаты термодинамического моделирования

Расчеты ПВСГ с получением ВДТ были выполнены в температурном интервале 300–2000 К и атмосферном давлении (0,101 МПа) [14]. Результаты расчета приведены на рис. 5–7. Из рис. 5 следует, что суммарная концентрация горючих компонентов увеличивается с ростом температуры процесса, достигая значения 60,2 об.% при температуре 1200 К. Удельная теплота сгорания горючего газа при этой температуре достигает 9270 кДж/кг. Отметим, что азот исходной смеси не образует вредных оксидов азота и представлен в основном молекулярным азотом (N_2) с концентрацией 49,4%, которая практически не изменяется в диапазоне температур 1000–1600 К. Концентрация оксидов азота (NO_x) ниже 5 мг/м³, что практически в 100 раз меньше, чем его концентрация в дымовых газах при традиционном сжигании угля на ТЭС. Содержащаяся в угле сера переходит в газовую фазу, образуя бескислородное соединение – сероводород (H_2S), концентрация которого при температуре 1200 К составляет 0,14%. При этом суммарная концентрация оксидов серы (SO_x) составляет менее 1 мг/м³.

Умеренное снижение концентрации углерода в коксовом остатке (рис. 6), из-за его газификации согласно реакциям: $C + H_2O = CO + H_2$, $C + CO_2 = 2CO$, наблюдается в диапазоне температур 600–1500 К, стремясь к нулю при температуре 2000 К за счет восстановления углеродом оксидов минеральной массы угля по формуле $Me_xO_y + yC = xMe + yCO$, где Me – это металл или

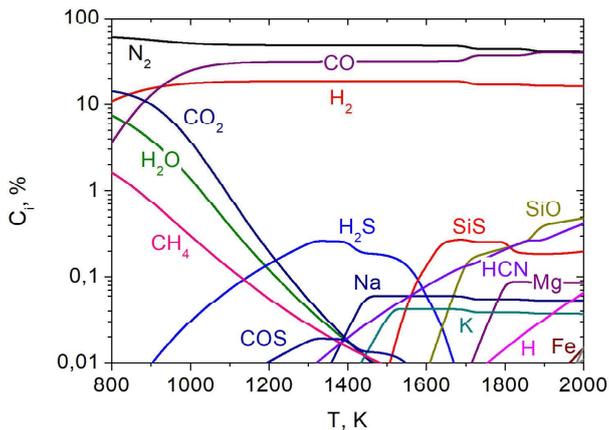


Рис. 5. Концентрация компонентов газовой фазы в зависимости от температуры процесса ПВСГ.

металлоид, а x и y – стехиометрические коэффициенты. Видно, что концентрации CO и H_2 возрастают с температурой, а концентрации конденсированного углерода (C(c)) и CH_4 снижаются. При $T = 1200$ К ВДТ представляет собой в основном синтез-газ ($\text{CO} + \text{H}_2$) и конденсированный углерод, массовые концентрации которых составляют 30,1 и 7,6%, соответственно. Удельная теплота сгорания полученного ВДТ достигает 14000 кДж/кг или с учетом физического тепла ВДТ – 16500 кДж/кг, что подтверждает его высокую способность к воспламенению при выходе в топочное пространство. В результате ПВСГ исходный низкосортный Экибастузский уголь в объеме ПТС превращается в ВДТ, нагретое до температуры его воспламенения. При смешении с вторичным воздухом в топке котла ВДТ устойчиво воспламеняется и стабильно горит без дополнительного сжигания другого высокореакционного топлива.

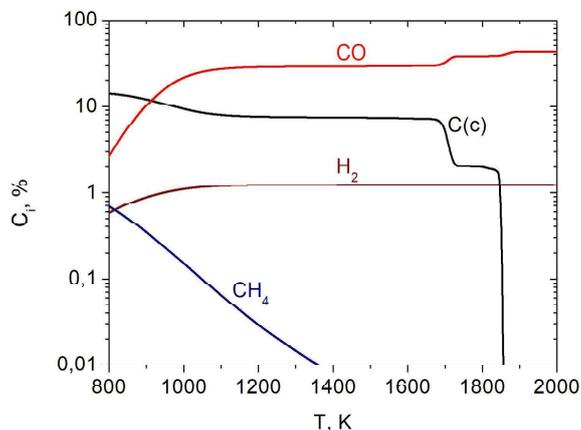


Рис. 6. Температурная зависимость массовой концентрации горючих компонентов полученного в процессе ПВСГ ВДТ.

Степень газификации углерода X_C (рис. 7), являющаяся важной характеристикой процесса ПВСГ, находится по концентрации углерода, содержащегося в коксовом остатке. Для расчета X_C используется выражение: $X_C = (C_{in} - C_{fin})/C_{in} \cdot 100\%$, где: C_{in} – исходная концентрация углерода в угле; C_{fin} – конечная концентрация углерода в конденсированных продуктах ПВСГ. Из рис. 7 видно, что степень газификации углерода возрастает с температурой, достигая 56,5% уже при температуре 1200 К, что достаточно для осуществления процесса ПВСГ. В интервале температур 1200-1700 К степень газификации изменяется мало из-за отсутствия окислителей в газовой фазе (рис. 5). При дальнейшем повышении температуры углерод реагирует с кислородом оксидов минеральной массы угля (табл. 1), восстанавливая их до металлов и металлоидов, образуя CO в газовой фазе.

Результаты термодинамического моделирования были использованы в качестве исходных данных для кинетического моделирования процесса ПВСГ в ПТС.

4. Результаты кинетического моделирования

Для численного исследования процесса ПВСГ в прямоточной цилиндрической ПТС использовали Экибастузский уголь (табл. 1). Расход угольной пыли составлял 1000 кг/ч, а расход воздуха – 1430 кг/ч, что соответствует концентрации пыли в аэросмеси 0,7 кг/кг. Начальная температура аэросмеси и внутренней стенки ПТС – 300 К, длина ПТС – 3 м, внутренний диаметр – 0,15 м. Расчеты ПВСГ угля выполнены для мощности плазмотрона ПТС 60 кВт. Фракционный состав угля приведен в таблице 2. Результаты расчетов представлены на рис. 8-10.

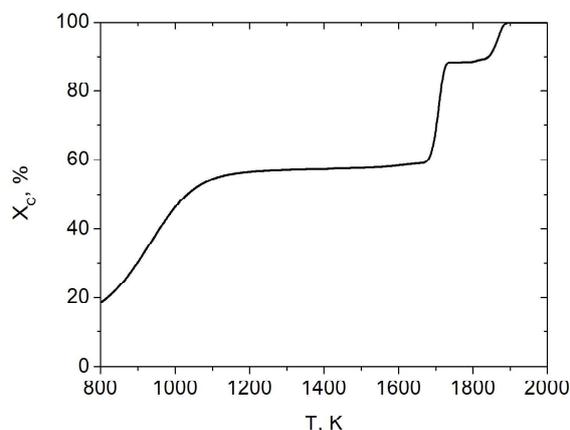


Рис. 7. Степень газификации углерода в зависимости от температуры процесса ПВСГ.

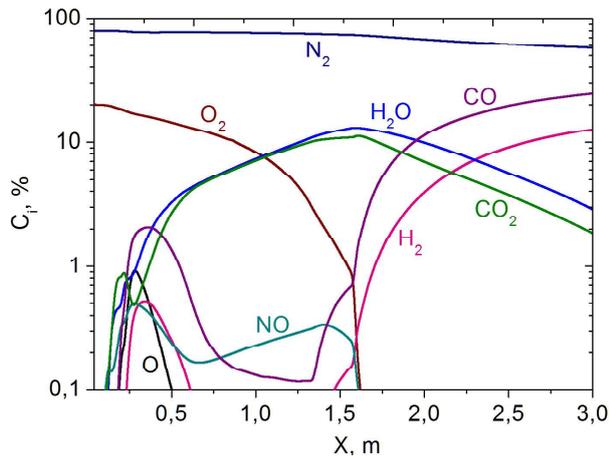


Рис. 8. Изменение состава газовой фазы по длине ПТС.

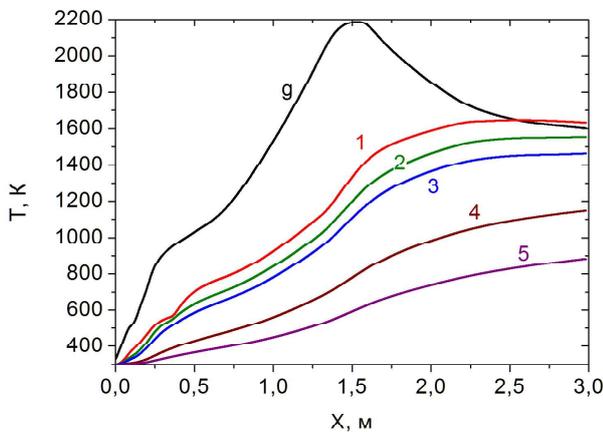


Рис. 9. Распределение температуры газа и угольных фракций по длине ПТС: 1, 2, 3, 4, 5 – фракции (табл. 2) и g – газ.

Как видно из рис. 8, на выходе ПТС получен горючий газ с содержанием: $\text{H}_2 = 12,7$ об.%, $\text{CO} = 24,8$ об.%, $\text{CO}_2 = 1,8$ об.%, $\text{H}_2\text{O} = 2,9$ об.% и $\text{N}_2 = 57,8$ об.%. Отметим, что суммарное содержание горючих компонентов в газе на выходе ПТС составляет 37,5%, а на длине ПТС 2 м их концентрация уже достигает значения 15%, являющегося одним из критериев устойчивого воспламенения ВДТ. При этом на длине ПТС 2 м достигается температура ВДТ 1650 К (рис. 9), которая превышает температуру его самовоспламенения (>1073 К). Отметим, что по всей длине ПТС температура газовой фазы превышает температуру всех фракций. На длине ПТС 2,6 м наблюдается инверсия температурных кривых газа и самой мелкой фракции, при которой на выходе ПТС температура частиц превышает таковую газа на 30 градусов.

Рисунок 10 показывает, что скорость частиц возрастает по всей длине ПТС, а скорость газа проходит через экстремум (100 м/с) на длине ПТС

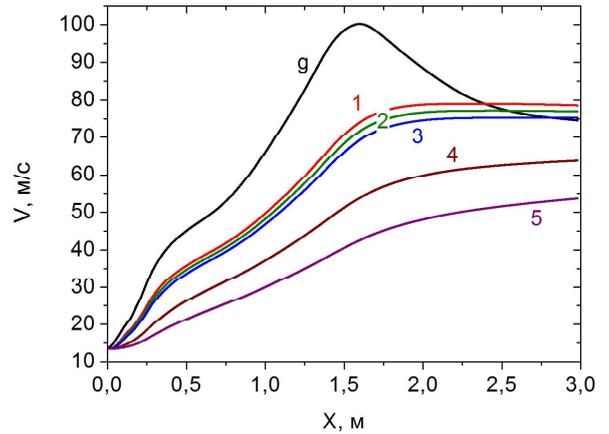


Рис. 10. Изменение скорости газовой фазы и фракций угля по длине ПТС: 1, 2, 3, 4, 5 – фракции (табл. 2) и g – газ.

1,6 м, снижаясь до 75 м/с на выходе ПТС. Скорости угольных фракций на выходе ПТС превышают 50 м/с, что значительно выше скорости аэросмеси при традиционном сжигании твердых топлив. Отметим, что по всей длине ПТС скорости всех фракций превышают 15 м/с, что исключает сепарацию угольных частиц при их транспортировке в горизонтальном пылепроводе.

Результаты кинетического моделирования были использованы при проведении экспериментальных исследований процесса ПВСГ в ПТС.

5. Эксперимент и сравнение с расчетными данными

Цель экспериментов заключалась в плазменном воспламенении аэросмеси, получении устойчивого факела ВДТ на выходе ПТС, определении температуры факела ВДТ, его состава, степени газификации углерода и их сравнении с расчетными данными. Было выполнено два эксперимента. После получения устойчивого воздушно-плазменного факела при мощности плазматрона 100 кВт осуществляли подачу в ПТС воздуха и угольной пыли с расходами 1,43 и 1 т/ч соответственно, что соответствует концентрации пыли Экибастузского угля в аэросмеси 0,7 кг/кг. При этих условиях достигалось устойчивое воспламенение и горение факела ВДТ на открытом воздухе (рис. 11). Отметим, что достижение устойчивого горения факела ВДТ на открытом воздухе является более сложной задачей, чем его воспламенение и горение в топочном объеме котла при организованной подаче вторичного воздуха. Длина факела ВДТ достигала 4-5 м.

Сравнение результатов стендовых исследований ПВСГ с результатами расчета представлено в таблице 4. Критериями для сравнения были выбраны одинаковые исходные данные для расчета и эксперимента (мощность плазмотрона, геометрические параметры ПТС, расходы угля и воздуха, концентрация угольной пыли в аэросмеси). Из таблицы следует, что температуру ВДТ варьировали в узком интервале 1443-1453 К, отличие от расчетной температуры не более, чем на 5%. Содержание горючих компонентов ($\text{CO} + \text{H}_2$) в газовой фазе варьировалось в интервале 32,1-37,1%, отличаясь от расчетного значения (37,5%) не более, чем на 17%. Степень газификации углерода изменялась в интервале 53,8-63,5%, отличаясь от расчетной величины не более, чем на 7%. Таким образом, расхождение между экспериментальными и расчетными значениями основных параметров процесса ПВСГ не превышает 17%. Учитывая сложность плазменных двухфазных процессов ПВСГ в многокомпонентных гетерогенных системах, такое расхождение расчетных и опытных данных можно считать удовлетворительным, саму математическую модель – адекватно отражающей основные закономерности ПВСГ, а программу PlasmaKinTherm – пригодной для использования в инженерных расчетах ПТС.



Рис. 11. Факел ВДТ на выходе ПТС в процессе стендовых испытаний.

Таблица 4. Сопоставление экспериментов по ПВСГ Экибастузского угля с расчетами

Метод	Т _{ВДТ} , К	C _i , об.%				X _c , %
		CO	H ₂	CO ₂	N ₂	
Эксперимент 1	1445	24,6	7,5	3,2	64,7	53,8
Эксперимент 2	1455	27,8	9,3	2,2	60,7	60,5
Расчет	1510	24,8	12,7	1,8	57,8	57,6

6. Заключение

Термодинамические расчеты выполнены с использованием программы TERRA. Расчетами установлены температурные зависимости концентраций продуктов ПВСГ и степень газификации углерода, которые были использованы в качестве исходных данных для кинетического моделирования процесса ПВСГ в ПТС. Найдено, что основным продуктом ПВСГ является ВДТ, а концентрации вредных выбросов – оксидов азота и серы при этом меньше, чем в дымовых газах ТЭС на два порядка.

С помощью кинетического моделирования процесса ПВСГ в ПТС с использованием программы PlasmaKinTherm найдены распределения по длине ПТС температур, скоростей и концентраций компонентов ВДТ. Полученные данные были использованы при проведении экспериментальных исследований процесса ПВСГ в ПТС. На выходе ПТС достигается температура ВДТ 1510 К с содержанием синтез-газа в ВДТ 37,5%, что удовлетворяет критериям устойчивого воспламенения ВДТ.

При проведении экспериментов по воспламенению низкосортного Экибастузского угля наблюдался стабильный факел ВДТ на выходе ПТС, измерены температура факела ВДТ, концентрации компонентов газовой фазы и определена степень газификации угля.

Сопоставление результатов экспериментов и расчетов показало их приемлемое согласие, что позволяет использовать программы PlasmaKinTherm и TERRA для инженерных расчетов ПТС.

Благодарность

Работа выполнена на экспериментальном стенде Института проблем горения при поддержке МНВО РК в рамках программно-целевого финансирования программы BR21882017.

Список литературы

- [1]. Smenet.org.2022. Coal's Importance to the World // Society for Mining, Metallurgy & Exploration. – 2022.
- [2]. Kellow G. The Surprisingly Sustainable Case for Coal. // Peabody. – March 2019. – P. 1-4.
- [3]. Powering the globe // Future coal. – 2024.
- [4]. Messerle V.E., Karpenko E.I., Ustimenko A.B. Plasma Assisted Power Coal Combustion in the Furnace of Utility Boiler: Numerical Modelling and Full-Scale Test // Fuel. – 2014. – Vol. 126. – P. 294-300.

- [5]. Messerle V.E., Karpenko E.I., Ustimenko A.B., Lavrichshev O.A. Plasma preparation of coal to combustion in power boilers // *Fuel Process. Technol.* – 2013. – Vol. 107. – P. 93-98.
- [6]. Gorokhovski M.A., Jankoski Z., Lockwood F.C., Karpenko E.I., Messerle V.E., Ustimenko A.B. Enhancement of Pulverized Coal Combustion by Plasma Technology // *Combustion Science and Technology.* – 2007. – Vol. 179(10). – P. 2065-2090.
- [7]. Messerle V.E., Ustimenko A.B., Tastanbekov A.K. Plasma ignition of solid fuels at thermal power plants. Part 1. Mathematical modeling of plasma-fuel system. // *Thermophysics and Aeromechanics.* – 2022. – Vol.29(2). – P. 295-310.
- [8]. Kanilo P.M., Kazantsev V.I., Rasyuk N.I., Schuenemann K., Vavriv D.M. Microwave plasma combustion of coal // *Fuel.* 2003. – Vol. 82. – P 187-193.
- [9]. Роговая М. Безмазутные технологии на ТЭС экономят миллиарды. // *Журнал «Коммерсантъ Наука».* – 2024. – №3. – С. 22.
- [10]. Kuznetsov V.A., Kumkova I.I., Lerner A.S., Popov V.E. Equilibrium analysis of hydrogen production using the steam-plasma gasification process of the used car tires. // *J. Phys.: Conference Ser.* – 2012. – Vol. 406. – P. 012023.
- [11]. Ma Y., Qi H., Zhang J., Cui P., Zhu Zh., Yinglong Wang Y. Thermodynamic analysis of a carbon capture hydrogen production process for end-of-life tires using plasma gasification. // *J. of Clean. Production.* – 2023. – Vol.384 – P. 135662.
- [12]. Popov V.E., Subbotin D.I., Surov A.V., Popov S.D., Serba E.O., Godina E.P., Kiselev A.A. Co-gasification of lignite and used car tires by H₂O/air thermal plasma. // *J. of Phys.: Conference Ser.* 2019. – Vol. 1243. – P. 012010.
- [13]. 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 // *Journal of the Energy Institute.* – 2005. – Vol. 78(4). – P. 157-171.
- [14]. Messerle V.E., Ustimenko A.B. Modeling of Coal Ignition in Plasma-Fuel Systems with an Electric Arc Torch. // *IEEE Transactions on Plasma Science.* – 2020. – Vol. 48(2). – P. 343–349.
- [15]. Jankoski Z., Lockwood F.C., Messerle V.E., Karpenko E.I., Ustimenko A.B. Modelling of the Pulverised Coal Plasma Preparation for Combustion//*Thermophysics and Aeromechanics.* – 2004. – Vol. 11(3). – P. 461-474.
- ## References
- [1]. Society for Mining, Metallurgy & Exploration (2022) Coal's Importance to the World. <https://www.smenet.org/What-We-Do/Technical-Briefings/Coal-s-Importance-in-the-US-and-Global-Energy-Supp>
- [2]. Kellow G (2019) Peabody: 1-4. <https://www.peabodyenergy.com/Peabody/media/MediaLibrary/Industry%20Insights/CERAWeek-2019-Essay.pdf>
- [3]. Future coal (2024) Powering the globe. <https://www.worldcoal.org/sustainable-societies/improving-access-energy>
- [4]. Messerle VE, Karpenko EI, Ustimenko AB (2014) *Fuel* 126: 294-300. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.02.047>
- [5]. Messerle VE, Karpenko EI, Ustimenko AB (2013) *Fuel Process. Technol.* 107: 93-98. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.07.001>
- [6]. Gorokhovski MA, Jankoski Z, Lockwood FC, Karpenko EI, Messerle VE, Ustimenko AB (2007) *Combustion Science and Technology* 179 (10): 2065-2090. <https://doi.org/10.1080/00102200701386115>
- [7]. Messerle VE, Ustimenko AB, Tastanbekov AK (2022) *Thermophysics and Aeromechanics* 29(2): 295-310. <https://doi.org/10.1134/S0869864322020135>
- [8]. Kanilo PM, Kazantsev VI, Rasyuk NI, Schuenemann K, Vavriv DM (2003) *Fuel* 82: 187-193. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00201-6](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00201-6)
- [9]. Rogovaya M. (2024) *Journal «Kommersant Science» [Zhurnal Kommersant Nauka].* 3: 22. <https://www.kommersant.ru/doc/6559928>
- [10]. Kuznetsov VA, Kumkova II, Lerner AS, Popov VE (2012) *J. of Phys.: Conference Ser* 406: 012023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/406/1/012023>
- [11]. Ma Y, Qi H, Zhang J, Cui P, Zhu Zh, Yinglong Wang Y (2023) *J. of Clean. Production* 384: 135662. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135662>
- [12]. Popov VE, Subbotin DI, Surov AV, Popov SD, Serba EO, Godina EP, Kiselev AA (2019) *J. of Phys.: Conference Ser* 1243: 012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1243/1/012010>
- [13]. Gorokhovski M, Karpenko EI, Lockwood FC, Messerle VE, Trusov BG, Ustimenko AB (2005) *Journal of the Energy Institute* 78 (4): 157–171. <https://doi.org/10.1179/174602205X68261>
- [14]. Messerle VE, Ustimenko AB (2020) *IEEE Transactions on Plasma Science* 48(2): 343–349. <https://doi.org/10.1109/TPS.2019.2956847>
- [15]. Jankoski Z, Lockwood FC, Messerle VE, Karpenko EI, Ustimenko AB (2004) *Thermophysics and Aeromechanics* 11(3): 461-474.

Efficiency of plasma technology for preparing solid fuels for combustion

V.E. Messerle, M.N. Orynbasar, A.B. Ustimenko*

Al-Farabi Kazakh National University, 71, Al-Farabi ave.,
Almaty, Kazakhstan

ABSTRACT

A thermodynamic analysis was performed, which made it possible to find the operating parameters of plasma technology for preparing solid fuels for combustion. Kinetic calculations of plasma ignition and stable combustion of a pulverized coal torch were performed using the PlasmaKinTherm program. Profiles of temperatures, velocities and concentrations of combustible gas and coal particles along the length of the reaction zone of a plasma-coal burner were obtained. In experiments on plasma preparation of thermal coal for combustion, stable ignition of a pulverized coal torch was obtained, the temperature and composition of the resulting highly reactive two-component fuel were measured, and the degree of carbon conversion of high-ash Ekibastuz coal was determined. A comparison of the results of experiments and calculations showed acceptable agreement. It has been shown that the main product of plasma ignition and stabilization of coal combustion is a highly reactive two-component fuel, and the harmful emissions concentrations, nitrogen and sulfur oxides, are two orders of magnitude lower than in thermal power plants' flue gases.

Keywords: plasma preparation for combustion, solid fuel, combustible two-phase fuel, plasma-coal burner, numerical study, experiment

Қатты отынды жағуға дайындаудың плазмалық технологиясының тиімділігі

В.Е. Мессерле, М.Н. Орынбасар, А.Б. Устименко*

эл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, эл-Фараби даңғылы, 71, Алматы, Қазақстан

АНДАТПА

Қатты отынды жағуға дайындаудың плазмалық технологиясының жұмыс параметрлерін табуға мүмкіндік беретін термодинамикалық талдау жасалды. Плазмалық тұтанудың және шаң-көмір алауының тұрақты жануының кинетикалық есептеулері PlasmaKinTherm бағдарламасының көмегімен жүзеге асырылады. Плазма-көмір оттығындағы реакция аймағының ұзындығы бойынша жанғыш газ бен көмір бөлшектерінің температурасының, жылдамдығының және концентрациясының профильдері алынды. Энергетикалық көмірді жағуға плазмалық дайындау бойынша тәжірибелерде шаң-көмір алауының тұрақты тұтануы алынды, алынған жоғары реакциялы екі компонентті отынның температурасы мен құрамы өлшенді, сондай-ақ күлі жоғары Екібастұз көмірінің көміртегі конверсия дәрежесі айқындалды. Эксперименттер мен есептеулердің нәтижелерін салыстыру олардың қолайлы келісімін көрсетті. Көрсетілгендей, көмірдің плазмалық тұтану және жануын тұрақтандырудың негізгі өнімі жоғары реакциялы екі компонентті отын болып табылады, ал зиянды шығарындылардың, азот пен күкірт оксидтерінің концентрациясы жылу электр станцияларының түтін газдарына қарағанда екі ретке аз.

Түйін сөздер: плазманы жағуға дайындық, қатты отын, жанғыш екі фазалы отын, плазмалық көмір оттығы, сандық зерттеу, эксперимент