

валов из нее не было обнаружено. Обработка угольного пласта проходила без признаков газодинамических явлений.

Таким образом, гидродинамическое воздействие на напряженный газонасыщенный угольный массив является эффективным средством дегазации и снижения газодинамической активности нижней части крутых выбросоопасных пластов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дрыдин В.А. Экспериментальные исследования геофизических параметров и микроструктуры угля выбросоопасных зон угольных пластов / В.А. Дрыдин, Т.В. Михина, Д.В. Митрофанов / ГИАБ.- 2000.- №7.- С.210 – 211.
2. Бобин В.А. Особенности строения и свойств углей Восточного Донбасса и их перспективность для извлечения угольного метана / В.А. Бобин, И.Б. Ковалева, Е.А. Соловьева / ГИАБ.- 2000.- №7.-С. 185 – 187.
3. Гидродинамическое воздействие на газонасыщенные угольные пласты / [А.Ф. Булат, К.К. Софийский, Д.П. Силян и др.]. – Днепропетровск: «Поліграфіст», 2003 – 220 с

УДК 622.278:533.92:621.039.61

С.Л. Давыдов вед. инж.
(ИГТМ)

ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СВОБОДНО-ИСТЕКАЮЩЕГО ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА, ФОРМИРУЕМОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМОЙ

Наведено результати досліджень параметрів процесу спалювання пиловугільного палива при введенні його безпосередньо в плазмовий струмінь та горіння факелу в режимі вільного витоку. Встановлено, що в цьому випадку факел є нерівноважна гетерогенна система, термодинамічний стан якої визначається кореляцією тисків сублимового і насиченого парів вуглецю.

THE FEATURES OF PHYSICOCHEMICAL PROCESSES OF THE FREE OUTFLOW TWO-PHASE FLOW FORMED HIGH-TEMPERATURE PLASMA

The results of research of the combustion process parameters of pulverized-coal fuel at entering it directly into the plasma jet and the torch combustion in the regime of free outflow. It is founded that, in this case, the torch is a non-equilibrium heterogeneous system; whose the thermodynamic state is determined by the pressure correlation of sublimated and saturated vapor of a carbon.

Горение угольной пыли и пылеугольного факела является важной и актуальной проблемой, интерес к которой в последнее время в значительной степени возрос. Скорость горения угольных частиц в общем определяется такими факторами, как скорость реакции поверхностной диссоциации и скорость поверхностной десорбции. Эти факторы являются функцией температуры поверхности твердой фазы, пороговым значением энергии активации диссоциации, плотности потока молекул у межфазной границы. Плазменная газификация пылеугольного топлива является одним из наиболее эффективных методов, позволяющим интенсифицировать процесс термической переработки уг-

ля посредством увеличения флуктуации температуры и путем форсирования элементарных межфазных физико-химических процессов.

На рисунке 1 приведены фотографии пароводяного (а) и пылеугольного (б) факелов.

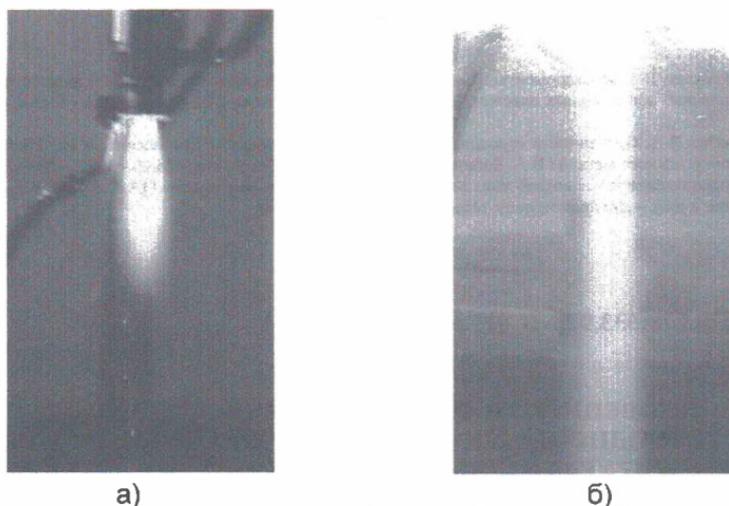
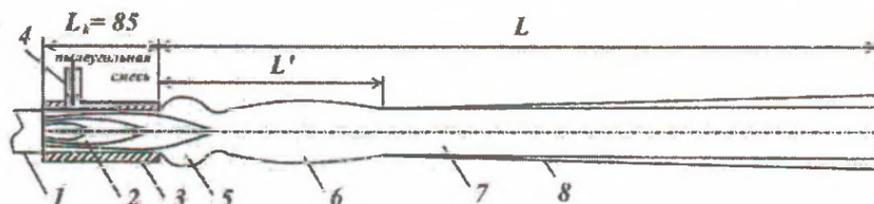


Рис. 1 – Фотография: а) пароводяного и б) пылеугольного факелов

Факелы на рисунке 1 качественно отличаются друг от друга. Если факел водяной плазмы (рисунок 1а) ограничен зоной адиабатического расширения и его длина составляет 70-90 миллиметров, то плазменный пылеугольный факел (рисунок 1б), его структура, приведенная на рисунке 2, определяется горением угольных частиц, и длина достигает величины порядка 1м.



1 – плазмоторн; 2 – пароплазменная струя; 3 – камера сгорания; 4 – патрубок для подачи в камеру угольной пыли; 5 – зона адиабатического расширения пылеугольной пароплазменной струи; 6 – плазмоугольный (комбинированный) факел; 7 – цилиндрический столб; 8 – оболочка, образующаяся вокруг цилиндрического столба плазмоугольного факела.

Рис. 2 – Структура пылеугольного пароплазменного факела

Плазменный факел получали путем пропускания пароводяной струи (2) плазмотрона (1) через цилиндрическое сопло камеры сгорания (3), по выходу из которого в плазму эжектировалась через патрубок (4) пылеугольная смесь. Внутренний диаметр сопла равен 20 мм, наружный диаметр – 40мм. Длина сопла $l_{\text{сопла}}=83\text{мм}$. В таблице 1 приведены технические характеристики плазмотрона.

Таблица 1 – Технические характеристики плазмотрона и плазменной струи.

Показатели	Величина
Мощность плазмотрона, кВт	40
Ток дуги, А	220
Напряжение дуги, В	180
Расход, кг/ч	
угля марки АШ	11
водяного пара с температурой 390-400К	7,2
длина струи, мм	70-80

Исследование параметров процесса сжигания пылеугольного топлива с непосредственным вводом его в плазменную струю осуществлялись на лабораторном стенде в диапазоне изменения параметров: мощность плазменного реактора 30-40 кВт; тока дуги 200-250 А; напряжении на дуге 150-200 В; расхода водяного пара – 2-4 г/с; расхода пылеугольного топлива – 10-15 кг/ч. В качестве исходного сырья использовался пылевидный уголь марки АШ со следующими физико-химическими характеристиками: $A^c=36\%$, $C^c=55\%$, $H^c=1,7\%$, $N^c=0,43\%$, $S_{\text{общ}}=0,8\%$, $O^c=5,26\%$, $V^c=6,8\%$, $Q=18\text{МДж/кг}$. В качестве транспортирующего газа пылеугольного топлива использовался сжатый воздух.

На рисунке 2 отчетливо выделяются цилиндрическая оболочка (8), простирающаяся практически по всей длине факела и столба (7). При исследовании изменений в спектре излучения факела вдоль оси струи (7) обнаружено четкое постоянство структуры плазменного пылеугольного цилиндрического столба, а спектральные исследования оболочки (7) плазменного столба показали его уширение в направлении развития факела из-за химических реакций, протекающих в узкой зоне контакта воздушного и плазменного газофазного топливного потока.

Газофазное горение протекает не только вдоль наружной оболочки факела, но и в присоевом пространстве факела. У вершины факела наблюдается турбулизация вследствие пульсационного горения, обусловленного пульсациями кислорода, поступающего из атмосферного воздуха.

Истекающий из цилиндрического сопла высокоэнтальпийный присоевой поток в процессе адиабатического расширения растекается в радиальном направлении и простирается вдоль направления распространения факела на расстояние L' . Область между высокоэнтальпийным ядром (7) и контактной границей на расстоянии, превышающем расстояние L' , образует оболочку (8) наполняемую истекающей углеродной плазмой. Плотность газа в этой

оболочке значительно меньше плотности газа в окружающем пространстве, то есть плотности воздуха. В спектре излучения ядра факела преобладает континуум, излучаемый частицами угля. Его интенсивность незначительно изменяется в радиальном направлении, а в приосевом направлении уменьшается по мере распространения факела в пространстве. В спектре излучения ядра факела присутствуют полосы радикала OH при длине 306,4 нм. Наружная горячая оболочка синего цвета, в спектре излучения которой преобладают полосы молекул $CO(A^1\pi, b^3\Sigma, a^3\pi)$ в области длин волн $\lambda=266,63-238,88$ нм и полосы $CO_2(A\pi, C^2\pi)$ с длиной волны 236,45-278,05 нм, по мере развития факела, наоборот, увеличивалось в радиальном направлении, что свидетельствует о преобладании газозафазных химических реакций в факеле по мере его развития.

Число Рейнольдса равно:

$$R_e = \frac{r_0 w}{\frac{\mu}{\rho}}, \quad (1)$$

где r_0 - радиус сопла;
 w - скорость потока;
 μ - вязкость газа;
 ρ - плотность.

Подставляя в формулу (1) значение скорости потока, равное

$$w = \frac{G}{\left(\frac{\pi d^2}{4} \right)} \quad (2)$$

в (1) получим значение числа Рейнольдса

$$R_e = \frac{4G}{\pi d \mu} \quad (3)$$

Подставляя в формулу (3) $d=20$ мм, $G=11$ кг/час, $\mu=675 \cdot 10^{-7}$ н·с/м² для H_2O и $\mu=453 \cdot 10^{-7}$ н·с/м² для CO_2 , получим $R_e=2500-3000$. Полученное значение R_e близко критическому значению $R_e \approx R_{e\text{кр}}=2300$, при котором и при более низких значениях R_e поток является ламинарным. Однако в плазме плазматрона относительно высокая степень ионизации газа. Кулоновское взаимодействие является дальнедействующим взаимодействием. Поэтому кулоновское расталкивание может приводить к уменьшению $R_{e\text{кр}}$ до значений равных $R_{e\text{кр}}=800-900$.

На ранних стадиях газификации при высокой скорости нагревания внутри зерен углерода развивается высокое давление газа, происходит растрескива-

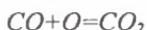
ние последних с образованием множества частиц углерода нанометровых размеров. На поверхностях образующихся наночастиц наблюдаются активные центры в виде оборванных связей. Сталкиваясь между собой частицы коагулируют, в результате чего образуются агрегаты со множеством пор. Агрегаты будут образовывать в процессе агрегации ограниченной диффузией (ДОА) пространственные структуры с фрактальными свойствами[1,2]. Процессы деструкции агрегатов и ассоциация наночастиц будут протекать в ядре факела. Соотношение между процессами роста и деструкции пространственных структур определяется как плотностью угольных частиц, так и их температурой. Изменение природы окружающего газа, по мнению Воля и соавторов[2], увеличивает вязкость газа в 6-7 раз. Поэтому число Рейнольдса в цилиндрическом канале плазменного факела будет уменьшаться до значений $Re < 800$, которое меньше $Re_{кр} R_{ср}$, препятствуя тем самым развитию турбулентности в ядре плазменного факела. Этим объясняется, что поверхность ядра факела имеет приблизительно цилиндрическую форму и является близкой к ламинарной. Сублимация и выгорание углерода в пространственных структурах коксового остатка занимает большую часть времени процесса газификации угля в плазменной струе. Поэтому цилиндрическая форма факела сохраняется на большой длине, равной $L \sim 1\text{м}$.

На участке $L' \leq 28\text{см}$ протекает процесс выделения летучих из угольных частиц, а также процессы газификации угольных частиц в водяной плазме при их взаимодействии с продуктами пиролиза воды – радикалами H , OH и O .

На участке (7) преобладают процессы, обусловленные сублимацией коксового остатка. На граничной поверхности в оболочке факела протекает процесс окисления атмосферным кислородом окиси углерода, образовавшейся в ядре факела при взаимодействии коксового остатка с кислородом. Горение угольных частиц в факеле протекает в диффузном режиме. Радикалы OH , полученные из H_2O , окисляют CO в двуокись углерода в реакции



Отмечается, что реакция (4) единственная реакция в данном механизме. Реакцию



можно исключить, поскольку она нарушает правило сохранения спина. Прямая реакция с кислородом



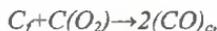
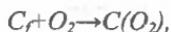
мало вероятна, так как реальные сухие смеси CO с O_2 характеризуются чрезвычайно низкими скоростями горения или не могут воспламениться во-

обще.

В работе [3] показано, что кислород при горении частицы не доходит до ее поверхности и окись углерода восстанавливается до уголекислоты в газовом пространстве оболочки плазменного факела, с выделением тепла, обеспечивающим хемилюминесцентное излучение CO_2 в фиолетовой области спектра. В отношении образования CO в факеле следует отметить, что хемосорбция кислорода на угле – первый этап, ведущий к твердофазному процессу газификации угля. Угли имеют различное сродство к кислороду. Максимум хемосорбции соответствует максимуму содержания свободных радикалов в угле.

Начальная хемосорбция, характеризуется низкой энергией активации. Это указывает на то, что процесс контролируется диффузией. При ТТО происходит увеличение общего содержания ароматики, полициклических ароматических структур.

Недавно был предложен механизм реакции углерода с кислородом, включающий реакции [4]:



где C_f – углерод с болтающейся свободной связью;

$C(O_2)$ – адсорбированная молекула кислорода, которая появляется прежде чем наступит образование оксидного комплекса на поверхности;

$(CO)_c$ – стабильный оксидный комплекс на поверхности.

Первая и вторая реакции представляют образование оксидного комплекса на поверхности в процессе хемосорбции. Третья реакция представляет десорбцию оксидного комплекса, четвертая и пятая реакции – газификацию оксидного комплекса на поверхности.

Таким образом, факел, образующийся при истечении плазменной струи, запыленной угольными частицами, за счет протекания в нем реакций образования ингредиентов синтез-газа и включающих в себя образования активных радикалов и ионов, а также процессов образования тепловых и гидродинамических неоднородностей, представляет собой неравновесную гетерогенную систему, термодинамическое состояние которой существенным образом определяется корреляцией давлений сублимирующего и насыщенного паров углерода.

Тепловое излучение играет важную роль в процессах передачи энергии

при высоких температурах. Теплопередача от факела, полученного при плазмохимическом пиролизе пылеугольного топлива в промышленных печах и камерах сгорания, является решающим фактором, определяющим тепловые и аэродинамические характеристики, эффективность работы агрегатов такого типа.

Полученный факел может быть использован для отопления и обогрева тепловых установок, где по условиям технологии необходимо равномерное и растянутое по длине камеры горения и недопустим контакт факела с ограждениями камеры.

Полученный факел может найти применение в производстве для локального нагрева изделий, где требуется повышенный подвод тепла при направленном горении. Следует отметить, что теплоотдача от пылеугольного факела выше, чем от подобного турбулентного факела, в котором имеет место значительное подмешивание окружающей среды, увлекаемой в струю факела.

Однако, наиболее важным свойством полученного факела является практически полная газификация в нем углерода каменноугольного материала, обеспечиваемая относительно большим временем пребывания угольных частиц в плазменном факеле, простирающимся на большую длину вдоль направления распространения струи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Таран, Э.Н. Образование наноструктур углерода при лазерном испарении каменноугольного материала [Текст] / Э.Н. Таран // Водородное материаловедение и химия углеродных материалов ICHMS : материалы междунар. конф. – К.: АНЭИ, 2007. – С. 402-405.
- 2 Таран, Э.Н. Об устойчивости, структуре и свойствах жесткого ламинарного факела [Текст] / Э.Н. Таран, Г.Т. Цыганков // Тепло- и массообмен в химических реагирующих системах : IV Минский междунар. форум по тепло- и массообмену. – Минск, 2000. – Т. 4. – С.179-188.
- 3 Лавров, Н.В. Процессы горения топлива и защита окружающей среды [Текст] / Н.В. Лавров, Э.И. Розенфельд, Г.Г. Хаустович. – М.: Металлургия, 1981. – 240 с.
- 4 Hshien, F.Y. Factors influencing chemisorbtion and ignition of wood chars [Текст] / F.Y. Hshien, G.N. Richards. – Comb Flame, 1989. – P. 37-47.