

СТРУКТУРА И ВЗАИМОСВЯЗЬ ПРОЦЕССОВ
КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ
УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ СРЕД МЕТОДОМ
ПЛАЗМЕННОЙ ГАЗИФИКАЦИИ

STRUCTURE AND THE RELATIONSHIP BETWEEN
PROCESSES OF COMPLEX TREATMENT OF
CARBONACEOUS MEDIA BY PLASMA GASIFICATION

© 2014 Булат А.Ф., акад. НАНУ,
Холявченко Л.Т., к.т.н.,
Давыдов С.Л. (ИГМ НАНУ),
Рудыка В.И., к.э.н.
(ГП «ГИПРОКОКС»)

Bulat A.F., Academician of NASU,
Kholiyavchenko L.T., PhD in technical sciences,
Davydov S.L. (IGM of NASU),
Rudyka V.I., PhD in economics
(SE "GIPROKOKS")

Выполнен сравнительный анализ технологий прямого (одноцелевого) сжигания с технологией термической подготовки углеродсодержащих сред, в том числе углей различной степени метаморфизма, путем их переработки аллотермическим, плазменным способом. Установлены: качество и количество выхода продуктов высокотемпературной переработки углей разных угледобывающих районов Украины; значение температуры полной конверсии углерода этих углей; степень влияния коэффициента избытка окислителя на процессы переработки; влияние природы окислителя на количественные и качественные показатели процесса. Схематично представлены структура и взаимосвязь процессов комплексной переработки методом плазменной газификации.

A comparative technological analysis has been given of of direct (single-purpose) combustion and thermal treatment of carbon-containing environments, including coals of varying degrees of metamorphism, with the help of allothermic, plasma method. The next data has been determined: the output and the quality of products of high-temperature processing of coals of different coal mining areas of Ukraine; the temperature of complete conversion of the carbon of the coal; the influence of the coefficient of oxidant excess on the treatment; the influence of the nature of oxidant on the quantitative and qualitative characteristics of the process. It has been presented schematically the structure and the relationship between the processes of complex treatment by plasma gasification.

Ключевые слова: альтернативные источники, плазма, газ, комплексная переработка, термодинамика, кинетика, синтез-газ.

Keywords: alternative sources, plasma, gas, complex treatment, thermodynamics, kinetics, synthesis gas.

Значительное удорожание газа и жидких углеводородов, происходящее во всем мире, делает производство энергии и тепла из этих топлив практически нерентабельным. И, несмотря на временные колебания цен, тенденция их увеличения неизбежна по объективным причинам.

Альтернатива нарастающим проблемам в теплоэнергетике, металлургической и химической промышленности – переход к использованию твердого топлива. Однако, прямой переход – проблема сложная и дорогостоящая. Наиболее удачным решением в этом направлении может быть перевод таких потребителей на газ через газификацию углеродсодержащих сред, в том числе углей различного качества, шламов, твердых бытовых отходов.

Состоящий из многих компонентов органического и минерального происхождения, уголь является сложной гетерогенной системой, характеризующейся не только химическим составом, но и условиями залегания, добычи, транспортировки и последующей переработки. С увеличением объемов добычи угля и с течением времени проблемы нарастают, что обусловлено непрерывным понижением добычных горизонтов, увеличением напряженного состояния массива под действием налегающих пород, газонасыщенностью добычных горизонтов, проявлением такого грозного явления как выбросы газа. Непрерывно снижается качество добываемого угля, увеличивается диспропорция в балансе разведанных и добываемых, каменных и бурых углей. Угрожающими темпами накапливаются шламы, зола и угли, мало пригодные в энергетике, металлургии и химии. Так, с 1965 г. зольность энергетических углей Приднепровско-Донецкого бассейна возросла с 20 до 40 % [1]. Естественно, это в значительной степени

отражается на экономических, экологических показателях и надежности работы действующих энергогенерирующих предприятий и побуждает прибегать к разработке дополнительных, зачастую дорогостоящих мероприятий. Эти проблемы есть следствие технологии прямого сжигания твердого топлива. Построенная на принципе одноцелевого использования угля по формуле $C+O_2=CO_2+Q$ она изначально обречена на многие недостатки, вынужденно подвергаясь непрерывному совершенствованию. Совершенствуются системы подготовки, подачи, смешивания, обогащения, улучшаются процессы сжигания в кипящем, циркулирующем слоях. Применяются дополнительные меры по воспламенению и поддержанию процесса горения низкокалорийных углей организацией «подсветки» газом или нефтью. Все это связано с большими материальными и трудовыми затратами. Процесс прямого сжигания сопровождается выбросами в атмосферу тысяч тонн пыли, двуокиси углерода, окислов азота, особенно токсичных фуранов и диоксинов. Проблемы прямого сжигания усугубляются неизбежным «недожогом» углерода, который составляет 10-20 % и зависит от качества угля, окислительной среды, режимов горения. Такое количество углерода в золе делает ее малопригодной для прямого исполь-

зования и тысячи ее тонн, накапливаясь в зольных отвалах, отравляют окружающую среду из-за сохраняющихся реакционных свойств

Основной компонент золы – минеральная масса угля, неизбежно сопровождающая добычу и сжигание, увеличивающаяся в объемах и в добавочной стоимости на всех этапах переработки. При одноцелевом использовании угля минеральная масса с остатками углерода попадает в отвалы. Эти миллионы тонн отходов, накапливаясь в отвалах, ухудшают экологические и экономические показатели добычи и переработки угля. Показатели зольности основных угледобывающих районов Украины приведены в табл. 1 [1] и представлены в основном окислами Si, Al, Fe, Ca, Mg и др. В отдельных месторождениях Донецкого бассейна содержание Fe_2O_3 в золе достигает 40 %, окислов Al – до 30 %. В каждой тонне угля, поднятой на поверхность, содержится окисленных железа и алюминия от 50 до 100 кг, SiO_2 – 100-120 кг, CaO – 10-15 кг, и др. Очевидно, что вся добываемая масса угля должна перерабатываться комплексно, в том числе и минеральная часть, с восстановлением и реализацией всех ее составляющих, снижающих затратные показатели процесса, что исключено в технологиях прямого сжигания.

Таблица 1

Показатели минерального состава углей и шламов Украины

Район залегания	Тип угля	Зола		Составляющие золы, (А)						
		А		SiO_2		Al_2O_3		Fe_2O_3		остальное
		%	кг/т	%	кг/т	%	кг/т	%	кг/т	
Донецкий	АШ1	25,96	259	8,76	87,6	12,11	121,1	2,77	27,7	2,32
	АШ2	30,2	302	15,3	153	7,08	70,8	4,42	44,2	3,4
	Газовый	22,5	225	11,4	114	5,3	53	3,29	32,9	2,51
Львовско-Вольнский	Нововольнский	19,9	199	11,23	112,3	4,12	41,2	2,21	22,1	2,34
Шламы		44	440	24,8	248	9,1	91	4,8	48	5,3

Это возможно путем предварительной термической переработки углеродсодержащих сред любого состава и качества методом их газификации с полной (100 %) конверсией углерода и восстановлением минеральной составляющей на специализированных предприятиях по месту добычи твердого топлива или возле крупных энергогенерирующих, химических или металлургических комплексов.

К настоящему времени накоплен достаточно большой опыт газификации твердого топлива. В его основе хорошо освоен и широко применяется автотермический метод газификации, который базируется на частичном использовании того же топлива для разгона и поддержания эндотермических реакций процесса газификации. Известны и широко применяются на практике технологии Лурги, Винклер, Коперс-Тоттек. Технологи-

гии второго поколения – Рур-100, БГЛ, НТВ, Техасо, Пренфло, каталитические – Бергбау, Ю-Гес, более совершенные Лурги-Рургаз, Коперс и др. [2, 3]. Однако, технологии и комплексы газификации, построенные на автотермическом методе, отличаются существенным недостатком – наличием в конечном продукте балластных и загрязняющих газов (CO_2 , N_2 , NO_2 и др.). Так, содержание CO_2 в целевом продукте достигает 10-30 %, азота – до 60 % при газифицирующем агенте воздухе. Могут присутствовать очень токсичные соединения серы, азота, продукты ароматических углеводородов. Последующая очистка газов от включений различного характера – дорогостоящий процесс. При температурах (1300-2000 К), характерных для автотермических методов газификации, невозможны процессы восстановления минеральной части угля.

Таблица 2

Состав газов, получаемых при некоторых способах газификации

Наименование	Lurgi [3]	Winkler [3]	Texaco [3]	Аллотермические (плазменные)			
				ГИАП [4]		ИГТМ [5]	
Газифицирующий агент	O ₂ +пар	O ₂ +пар	O ₂ +пар	возд. пар	м ³ /ч кг/ч	воздух (100 %) (АШ 1)	пар (100 %) (АШ 1)
Состав газа (%)							
H ₂	37-39	35-46	35	31	5-6	54-60	
CO	20-23	30-40	42-50	34,1	31-34	35-40	
CH ₄	10-12	1-2	0	-	-	-	
CO ₂	27-30	13-25	13-18	2,83	4-5	0-0,5	
N ₂	-	-	-	23	50-60	0	
H ₂ + CO	57-62	65-86	77-85	65,1	36-37	96-98	
Теплота сгорания, МДж/м ³	9-10	9-11	9	6-8	4,4-4,6	11,5-12	

Более перспективными могут быть разрабатываемые в настоящее время газификаторы третьего поколения – аллотермические. В этом случае энергия, необходимая для повышения реакционных качеств вносящих компонентов, поступает от независимых источников. Таковыми могут быть атомная энергия или энергия электронного луча. Наиболее подготовленной к использованию является энергия низкотемпературной плазмы, где плазмообразующими могут быть воздух, инертные газы, водяной пар, смеси различных газов. Разогретые в дуговом разряде до температуры 2000-7000 К они представляют собой систему из реакционных элементов – атомов, ионов, радикалов, электронов и свободных молекул. В этом случае, по так называемой разделенной схеме, плазменные потоки генерируются в плазматроне, а смешиваются с газифицируемой средой в другом реакционном пространстве (реакторе). Известны совмещенные схемы плазмообразования и газификации, когда высокорекционные элементы образуются в полях высоких температур дугового разряда (8,0-12·10³ К) и формируют крайней степени неравновесную систему в едином реакционном пространстве. В любом случае плазменные потоки могут обеспечить эффективный перенос энергии большой плотности ($q = 10^3-10^4$

Вт/см²), на несколько порядков увеличивая скорость реакции процесса газификации многофазных гетерогенных систем, которыми являются уголь, торф, древесина, твердые бытовые отходы. Эти параметры – основа высокой производительности процесса газификации в потоке и малых объемах реакционного пространства, что способствует снижению капитальных затрат на эксплуатируемом оборудовании и производственных площадях.

В табл. 3 представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований паро-плазменной газификации отдельных углей Украины, выполненные нами по совмещенной схеме. Очевидно, что газовая фаза продуктов газификации на 97-99 % состоит из восстановительного синтез-газа, в котором до 40 % оксида углерода и 50-57 % молекулярного водорода, генерируемого из деструктурируемой влаги, которая применяется в качестве окислителя. Практически отсутствуют какие-либо сторонние, тем более – вредные включения. Содержание нейтрального N₂ не превышает 0,9 %, а 5-7 % H₂O свидетельствует о недостаточном подборе стехиометрических соотношений топливных компонентов.

Таблица 3

Выход газовой и конденсированной фаз при паро-плазменной газификации углей

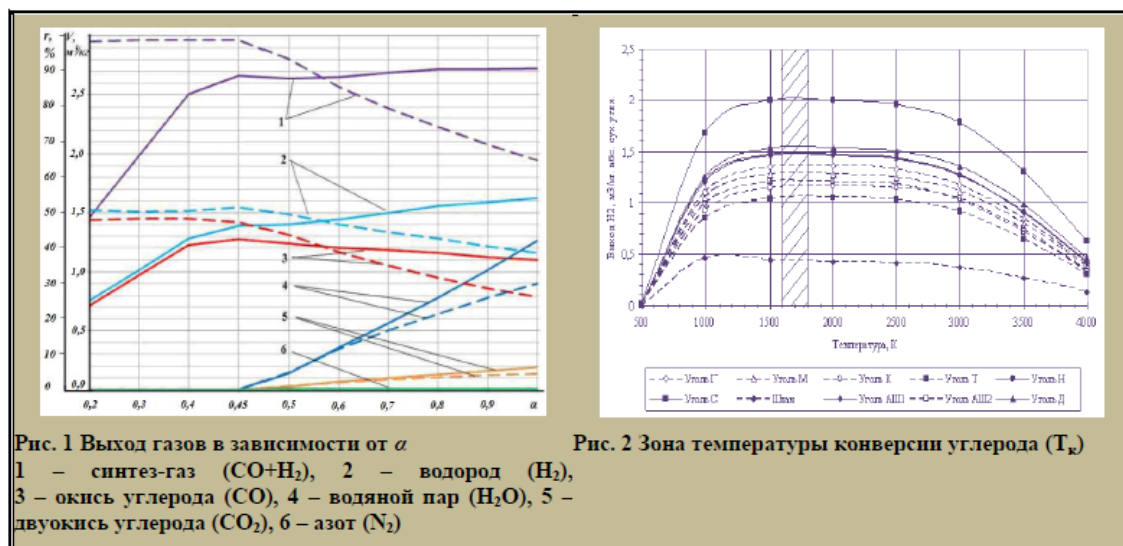
Тип угля	Газовая фаза (состав газа и выход газа)								Конденсированная фаза, кг/ т угля
	CO м ³	H ₂ м ³	N ₂ м ³	H ₂ O м ³	ΣV _i м ³	H ₂ + CO м ³ %		H ₂ /CO	
АШ 1	1,368	1,478	0,013	0,02	2,879	2,846	98,87	1,08	155
АШ 2	1,147	1,214	0,023	0,08	2,462	2,359	95,81	1,058	278
Газовый Г	1,1	1,364	0,020	0,027	2,511	2,465	98,18	1,24	166
Сапропелит	1,408	2,003	0,040	0,059	3,51	3,412	97,19	1,423	67
Шлам	0,472	0,425	0,130	0,108	1,135	0,897	79,04	0,9	415

В теоретических расчетах эти отношения удобно выразить коэффициентом избытка окислителя (α), представляющего собой отношение действительного расхода окислителя (V_d) к теоретически необходимому расходу при полном сгорании углерода (V_o). $\alpha = V_d / V_o$. Теоретически необходимый расход окислителя, коэффициент избытка окислителя и общее количество полученного газа определяются по формулам [6]. Коэффициент избытка окислителя рассчитывается индивидуально для каждого типа угля и зависит от суммы его газообразующих составляющих (углерода, серы, водорода, азота). Влияние α на показатели процессов пароплазменной газификации представлены на рис. 1. Установлено, что значение α в каждом конкретном случае имеет оптимальное значение, его уменьшение ведет к снижению общего объема выхода газа, а увеличение – к снижению его качества за счет увеличения содержания в газовой фазе CO_2 , H_2O . Для большинства углей стехиометрическое соотношение компонентов обеспечивается при α , изменяющемся в пределах 0,3-0,45 [7].

Установлены граничные значения температуры конверсии углерода (T_k), характеризующие степень его переработки в углеродсодержащей среде. В зависимостях выхода газов от температуры (рис. 2) видно, что рост процессов газообразования для всех типов углей прекращается в пределах 1600-1800 К, что определяет температуру полной конверсии углерода. Поле температуры в реакционном пространстве при использовании низкотемпературной плазмы может изменяться в диапазоне 2000-7000 К и более. Но повышение T_k свыше обозначенного значения ведет к снижению объема

генерируемого газа. В нарастающем порядке имеет место переход молекулярного водорода в атомарный, повышаются энергозатраты. Однако дальнейшее повышение температуры процесса может быть целесообразным при полной, комплексной переработке минеральной составляющей углеродсодержащей среды. Термодинамические исследования на углях типа АШП показывают, что перегрев его зольной части от температуры конверсии углерода 1600-1800 до 2800 К может полностью восстановить составляющие конденсированной фазы (табл. 3). С каждой тонны переработанного угля можем получить до 150-200 кг Al, 120-130 кг Fe, химически чистый кремний. При этом энергозатраты возрастут незначительно, всего на 14-15 %, с 2,8-3,2 до 3,2-3,6 кВт·ч/кг для углей разного типа. Прибыль от восстановленной минеральной массы и отсутствие выбросов в окружающую среду может значительно превосходить энергозатраты.

Установлено, что наиболее подходящим окислителем для газификации углеродсодержащих сред является водяной пар, как плазмообразующий высокоэнтальпийный агент. Он обеспечивает (табл. 4) экономию исходного топлива на 40-50 % за счет пополнения конечного продукта газификации молекулярным водородом из деструктурированной влаги, высокую его теплотворную способность (11,5-12 МДж/м³) и чистоту восстановительного синтез-газа, где $H_2 + CO$ составляет 97-98 %. Проблемы экологического характера решаются путем снижения выбросов в окружающую среду как в газовой, так и в минеральной форме до уровня ниже норм европейских стандартов.



Окислительная среда в процессах плазменной газификации

Окислитель	Выход газа, нм ³ /кг угля								Калорийность, МДж/м ³
	CO	H ₂	N ₂	H ₂ O	CO ₂	N ₂ C	ΣVi	CO+H ₂	
Воздух	1,20	0,25	2,33	0,01	0,01	0,08	3,88	1,45	4,4-4,6
Кислород	1,24	0,22	0,01	0,04	0,04	0	1,55	1,46	9-10,5
Водяной пар	1,27	1,39	0,01	0,001	0	0	2,67	2,66	11,5-12

Следует отметить потенциальные возможности совмещённых схем пароплазменной газификации в мощных электромагнитных полях дугового разряда. Под действием энергии высоких температур и мощного электромагнитного излучения в газовой среде образуются кластерные системы – устойчивые энергетические объединения атомов и молекул водорода, углерода и оксида углерода. Химическая формула газа остается неизменной, но энергетический его параметр – теплотворная способность – может быть выше калорийности метана [8]. Химическая формула газа, его структура и энергетическое состояние не описывается законами классической квантовой механики и квантовой химии. Такая газовая система может быть описана с позиций адронной механики и адронной химии [9].

Структуру процессов комплексной переработки углеродсодержащих сред методом плазменной газификации, взаимосвязь структурных образований представим схемой, разделенной на отдельные технологические и технические блоки (рис. 3). Схема может наглядно объяснить последовательность, назначение, взаимосвязь и полноту протекающих сложных технологических процессов газификации. Условно разделим ее на следующие блоки:

- подбора, анализа, подготовки углеродсодержащей и окислительной сред в их стехиометрическом соотношении;
- низкотемпературного пиролиза (по необходимости);
- термодинамических исследований установлением материального и энергетического балансов;
- химической кинетики процесса, определяющей скорости реакционных процессов;
- расчета реактора, исходя из заданных производительности, величины температурного поля в реакционной зоне и результатов термодинамических исследований;
- расчета параметров и подбора схем энергопитания реактора, соответствующих его производительности;
- расчета, разработки реактора, его изготовления, испытания и доводки;
- технико-экономического анализа.

Блок подготовки углеродсодержащей и окислительной среды включает системы измельчения и дисперсного анализа, аналитического определения ее физико-химических характеристик (поэлементный состав орга-

нической и минеральной частей), подготовки исходных компонентов в стехиометрических соотношениях, выбор блока подготовки окислителя, исходя из условий качества конечного продукта. В случае применения смеси окислителей различного типа производится расчет соотношения компонентов, определяются условия их смешивания и взаимодействия в многофазном потоке.

Известно, что угли невысокой степени метаморфизма, особенно бурые, богаты летучими веществами, парафинами, смолами, битумами и др. полезными химическими элементами. Если эти продукты присутствуют в исходной среде в объемах, представляющих интерес для народного хозяйства, то они должны быть подвержены термическому пиролизу по известным методикам. При газификации в окислительной высокотемпературной среде эти продукты будут переработаны в другие химические соединения, переходя в состав полученного газа. Газификации подвергается продукт пиролиза – полукокс, который должен направляться к последующей высокотемпературной переработке без снижения температуры и потери энергии.

Исследование процессов термической переработки равновесных гетерогенных систем методами химической термодинамики должны предшествовать любым экспериментальным и проектным работам. Для этого имеются хорошо отработанные и широко апробированные программы (например, «Астра-4»), позволяющие с достаточной степенью точности установить материальный и энергетический баланс реагирующей системы. Параметры взаимодействия системы – температура, давление, химический состав и физическое состояние реагирующих компонентов – могут варьироваться в широком диапазоне. Устанавливаемые материальный и энергетический балансы отражают количественный и качественный состав конечного продукта, а также энергетические показатели эндотермических и экзотермических реакций в системе термохимического равновесного реагирования. Эти параметры являются исходными для количественной оценки процесса газификации и оценки его технико-экономических показателей и позволяют подобрать рациональный вариант технологической схемы процесса. Термодинамические исследования в значительной степени сокращают объемы экспериментальных исследований, упрощают расчеты проектируемых конструкций.

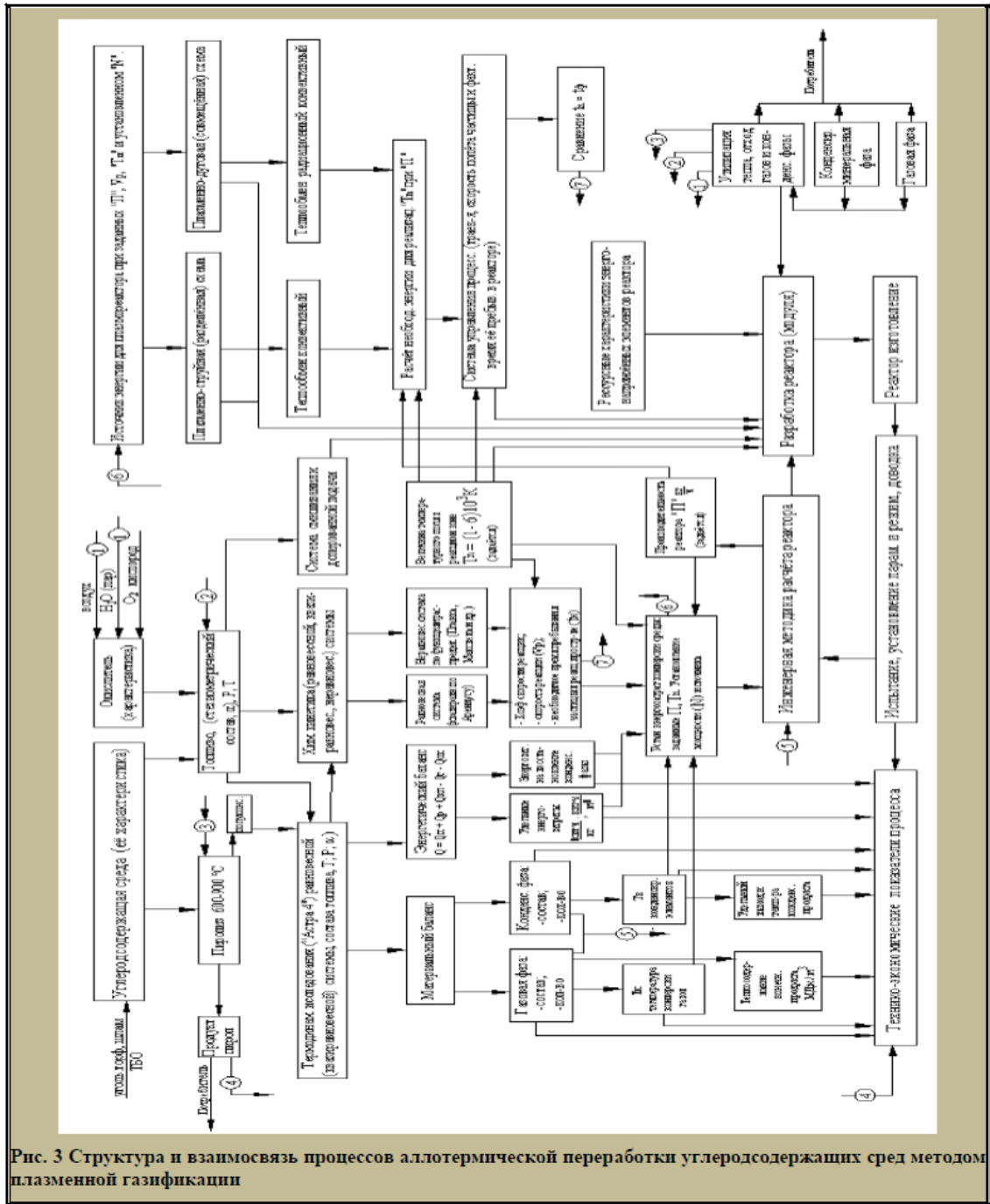


Рис. 3 Структура и взаимосвязь процессов аллотермической переработки углеродсодержащих сред методом плазменной газификации

Статическая система термодинамических исследований позволяет установить многие параметры термических преобразований, но она не показывает изменения их во времени. Структурными блоками химической кинетики предусматривается установить основные реакции превращений, определить скорости этих реакций и продолжительность пребывания частиц разной дисперсности в реакционной зоне до полного завершения в них термических преобразований, характеризующихся полной конверсией углерода, – в том числе и восстановительными процессами минеральной части. Устанавливается фактическая производительность преобразований при заданной температуре в реакционной зоне. Данные химической кинетики являются первоосновой математического моделирования процесса, они необходимы для определения технологических и конструктивных параметров реактора и являются определяющими при установлении методов управления как процессами, так и реактором. Показатели химической кинетики – константы скорости реакций, продолжительность пребывания частиц топлива в реакционной зоне – зависят от плотности энергии, температуры и характера теплопередачи в реакционном пространстве. Так, повышение температуры с 2000 до 4000 К ведет к увеличению скорости реакций на два порядка и уменьшению продолжительности пребывания частицы в реакционной зоне, при этом производительность этой зоны увеличивается в несколько раз.

Опираясь на блочную структуру представленной схемы (рис. 3) и определив функциональное назначение каждой из структур, взаимосвязь этих структур при комплексной переработке углеродсодержащих сред можно представить следующим образом. Изначально задаемся углеродсодержащей средой, подлежащей газификации. Определив ее физико-химические характеристики (элементный состав) экспериментальным путем или по справочной литературе, устанавливаем целесообразность первичной термической переработки пиролизом. В случае необходимости, на заранее установленном оборудовании выполняем этот процесс. Полученный в процессе пиролиза обогащенный углеродом полукокс (кокс) направляем на последующую газификацию. Термодинамические исследования углеродсодержащей среды в первоначальном виде или в виде полукокса необходимо произвести заранее, определившись с окислительной средой. Если необходимо получить конечный продукт с наибольшим содержанием синтез-газа высокой чистоты с определенным соотношением вносящих компонентов, то в качестве окислительной среды принимаем водяной пар или паро-кислородные смеси. Если в целевом продукте допустимо содержание азота, можно применить паровоздушные или другие смеси. Отношение этих компо-

нентов в окислительной среде оптимизируется путем расчета материального баланса при том или другом соотношении реагирующих компонентов. Расчетом материального и теплового баланса определяем выход, качественный и количественный состав целевого продукта, режимы его получения и удельные энергозатраты. Расчетных термодинамических показателей конкретного угля достаточно для определения технико-экономических показателей процесса и оценки его практической целесообразности в термической переработке. Продолжая разрабатывать систему, необходимо установить отдельные параметры химической кинетики процесса. Для этого изначально задаемся величиной температурного поля (или диапазоном температур). По разработанным методикам устанавливаем основные реакции, определяющие процесс газификации и степень равновесности плазменной системы. Константы скорости этих реакций определяются по уравнению Аррениуса (равновесные и квазиравновесные системы). В неравновесных системах эти параметры определяются по функциям распределения Планка, Стефана-Больцмана, Максвелла. По известным уравнениям определяются необходимая продолжительность пребывания частицы в реакционном поле с расчетными параметрами. Установленные термодинамические параметры газификации выбранной углеродсодержащей среды и параметры химической кинетики являются исходными для выбора схемы реакционного процесса, расчета основных параметров плазмохимического реактора, мощности источника энергопитания.

Ввод энергии плазмы в реакционную окислительную зону может производиться, как отмечалось выше, по разделенной и совмещенной схемам. Конструкции плазмохимических реакторов, построенных по этим схемам, разные, как разные системы управления, стабилизации процесса и условия теплопереноса и теплообмена в реакционном объеме. Более интенсивный теплообмен наблюдается в совмещенных конструкциях, имеющих более высокий КПД реактора. Их конструкция более компактна и менее металлоемка, но более сложны схемы управления процессом, его стабилизации, защитой энергонапряженных элементов конструкции от эрозийного износа.

Выводы

1. Пароплазменная газификация является способом, обеспечивающим комплексную, многоцелевую, безотходную, экологически чистую переработку в товарную продукцию углеродсодержащих сред, включая минеральную их составляющую.

2. Применение пароплазменной газификации углей, по сравнению с традиционными технологиями, повышает выход газа на 50-55 % за счёт водорода из дестру-



ктированной влаги окислителя, а его калорийность – до 11,3-11,7 МДж/м³. При этом продукт газификации на 98-99 % состоит из синтез-газа, представляющего собой высококачественную восстановительную среду.

3. Установлены рациональные параметры процесса пароплазменной газификации – температура конверсии углерода 1600-1800 К, коэффициент избытка окислителя (α) – 0,35-0,45, плотность теплового потока – 10^3 - 10^4 Вт/см².

4. Исходя из положений термодинамики высокотемпературных равновесных систем, кинетики плазмохимических превращений разработана структура и определена взаимосвязь процессов аллотермической переработки углеродсодержащих сред методом плазменной газификации.

5. Учитывая повышенный расход электроэнергии, затрачиваемой на плазмообразующие процессы, авторы считают целесообразным продолжить исследовательские и экспериментальные работы, направленные на уменьшение энергозатрат плазмохимических технологий.

Библиографический список

1. Долгий В.Я. Показатели расчета углей на шахтах Украины / В.Я.Долгий, А.А.Кривенко, М.Д.Шамало, В.А.Долгая // Уголь Украины. – 1999. – С. 240-245.

2. Тюнтонников Ю.Б. Технологические схемы, расчет и моделирование промышленных процессов газификации угля / Ю.Б.Тюнтонников, И.В.Шульга, М.С.Шенцовицкий. – Харьков: ХГЭУ, 1996. – 66 с.

3. Корчевой Ю.П. Экологически чистые угольные энерготехнологии / Ю.П.Корчевой, А.Ю.Майстренко, А.И.Топал. – Киев: Наукова думка, 2004. – 180 с.

4. Экономическая эффективность плазмохимической переработки угля. ГИАП РФ / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tbc-inv.ru/tech/2009.-09>.

5. Булат А.Ф. Комплексная переработка водоугольного топлива при плазменной газификации / А.Ф.Булат, Б.Д.Алымов, Л.Т.Холявченко, С.Л.Давыдов // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. ИГТМ НАН Украины. – 2010. – Вып. 81. – С. 20-27.

6. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент. Справочник. [Под общ. Ред. В.А.Григорьева, В.М.Зорина]. Книга 2. – М.: Энергоиздат, 1988. – 556 с.

7. Васильев Л.М. Оценка влияния коэффициента избытка окислителя на показатели процесса пароплазменной газификации. / Л.М.Васильев, Л.Т.Холявченко, Е.Ю.Писиды, С.Л.Давыдов // Материалы XXI Международной научной школы им. академика С.А.Христиановича: Таврический национальный университет им. В.И.Вернадского. – 2011.

8. Петров С.В. Плазменно-дуговая технология получения нового экологически чистого топлива / С.В.Петров, В.Н.Коржик, Г.С.Маринский, А.В.Вербовский // Сварщик. – 2007. – № 2 – С. 7-10.

9. Santilli R.M. Foundations of Hadronic Chemistry With Applications to New Clean Energies and Fuels / R.M.Santilli. – Boston-Dordrecht-London: Kluwer Academic Publishers, 2001. – 431 p.

Рукопись поступила в редакцию 29.05.2014