

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Угленородный массив Донбасса как гетерогенная среда / А. Ф. Булат, Е. Л. Звягильский, В. В. Лукинов [и др.]. – К. : Наук.думка, 2008. – 412 с.
2. Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР. Угольные бассейны и месторождения юга Европейской части СССР / Под ред. И.А. Кузнецова, В.В. Лапушина, М.Л. Левенштейна [и др.] – М.: Гос. научн.-техн. изд-во лит. по геол. и охране недр. – 1963.– Т. 1. – 1209 с.
3. Забигаило В.Е. Проблемы геологии газов угольных месторождений. / Забигаило В.Е., Широков А.З.– К.: Наукова думка, 1972. – 172 с.
4. Козлов С.С. Газонасыщенность среднекарбонных пород Лозовского углепромышленного района / С.С. Козлов, Ю.Г. Свербихин // Геомеханика управления состоянием напряженного газонасыщенного массива. – К. : Наукова думка, 1985. – С. 43-46.
5. Коротаев Ю.П. Добыча, транспорт и подземное хранение газа / Ю.П.Коротаев // М.: Недра, 1984. –488 с.
6. Инструкция по комплексному исследованию газовых и газоконденсатных скважин/ Под ред. Г.А. Зотова, З.С. Алиева.- М.: Недра, 1980.-301 с.
7. Багринцева К.И. Газоносность вмещающих пород и их значение в естественной дегазации угольных пластов / К.И.Багринцева, В.В.Шершуков // Уголь, 1960. - № 4. С. 36 – 38.
8. Зимаков Б.М. Нефтепроявления в Воркутском угленосном районе Печорского бассейна / Б.М. Зимаков, Ю.В. Степанов // Советская геология, 1965, №3. – С. 125 – 127.
9. Орда В.Я. Газоносность углей среднего карбона Донбасса и методика ее прогноза // Методы определения газоносности пластов и прогноза газообильности шахт. – М.: Госгортехиздат, 1962. - С. 75 – 88.
10. Широков А.З. Некоторые закономерности изменения пористости и газопроницаемости нижнекаменноугольных отложений Западного Донбасса /А.З. Широков, П.С. Исаев, И.Т. Кондратюк, В.Е. Забигаило // Геология и геохимия месторождений твердых горючих ископаемых, 1969. – № 1. – С. 14 – 21.
11. Тетеревенков В.В. Суфляры метана на шахтах Донбасса.– М.: Углетехиздат, 1952.– 48 с.
12. Фролов М.А. Суфлярные выделения метана в угольных шахтах. / М.А. Фролов, А.И. Бобров. – М.: Недра, 1971.– 159 с.
13. Малышев Ю.Н. Фундаментально прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов / Ю.Н. Малышев, К.Н. Трубецкой, А.Т. Айруни. – М. – Академия горн. наук, 2000. – 320 с.

**УДК 662.87:66.093:621.387.143**

Инж. С.Л. Давыдов  
(ИГТМ НАН Украины)

### **ПАРОПЛАЗМЕННАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДИСПЕРСНОЙ СИСТЕМЫ- ВОДА - УГОЛЬ**

В роботі приведені результати розрахунків параметрів термодинаміки процесу пароплазмової переробки водовугільної дисперсної системи та складено матеріальний баланс цього процесу.

### **THE STEAM PLASMA CONVERSION OF WATER-DISPERSED CARBON**

The work presented the calculation results of thermodynamic parameters of the process for steam plasma conversion of the water-coal dispersed system and compiled the material balance of this process.

Непрерывное удорожание на мировом рынке легких энергетических ресурсов нефти и газа, ограниченная их добыча и в то же время наличие значительного количества альтернативных источников энергии, в том числе низкосортных углей, отходов углеобогащения, загрязняющих окружающую среду, обуславливают актуальность процесса эффективной их переработки.

В мире 25% энергии производится из угля, запасов которого по многим прогнозам хватит, по меньшей мере, на несколько столетий и значение его как природного сырья возрастает. Однако при непосредственном сжигании угля

образуется большое количество вредных выбросов: диоксида серы  $SO_2$  и окиси азота  $NO_x$ , которые при контакте с атмосферной влагой образуют кислоты; газов, обуславливающих парниковый эффект – диоксида углерода  $CO_2$ , на долю которого приходится 50% выбросов, и  $NO_x$  – 10%. Экологическая угроза от всевозрастающего использования энергоносителей вызывает серьезное беспокойство мирового сообщества.

Прогрессивным направлением переработки угля по сравнению с уже известными методами, является плазменная газификация, особенно одна из ее разновидностей – пароплазменная, наиболее полно отвечающая требованиям экологии и современного производства. Особенностью данного способа является то, что он может быть эффективно использован не только для переработки угля, водоугольного топлива, но и широкого класса углеродосодержащих минеральных сред – отходов углеобогащения, шламовых отходов систем водоочистки, а также токсичных органических соединений. Генерируемые при этом высокие концентрации  $CO$  и  $H_2$  в синтез-газе позволяют использовать их с одной стороны в качестве исходного сырья для получения метанола, моторного топлива и других жидких энергетических видов химических соединений, а с другой применять их в качестве рабочих сред в технологиях с топливными элементами для получения тепла и электричества.

В основу создания плазмохимических реакторов легли исследования процессов плазменной газификации углей, относящиеся к высокотемпературным превращениям минеральных сред, определяющие пути интенсификации передачи энергии плазмы углеродсодержащим средам, в том числе углям различной степени метаморфизма [1-3]. К интенсифицирующим следует отнести создание локальных высокотемпературных зон, обладающих высокой плотностью энергии, что в свою очередь приводит к формированию неравновесных плазменных зон протекания физико-химических реакций конверсии углей.

Преимущества рассматриваемого способа переработки угля, по сравнению с традиционными, заключаются в: отсутствии выбросов оксидов азота, серы и других вредных веществ в окружающую среду; повышенной плотности энергии в реакционной зоне; высокой производительности; наибольшем выходе синтез-газа с единицы массы угля, за счет диссоциации воды используемой в качестве окислителя.

Плазмохимические реакторы, в зависимости от способа ввода газифицируемого агента в реакционную зону, разделяются на реакторы раздельного, когда газифицируемый агент вводится в уже сформированный газовый поток, и совмещенного типа, когда тот же агент вводится непосредственно в зону горения дугового разряда [4]. При использовании плазмохимического реактора совмещенного типа нагрев топлива происходит непосредственно в электрическом разряде, где частицы угля претерпевают интенсивный нагрев за счет передачи им энергии в результате теплопроводностью, конвекцией и излучением, что значительно увеличивает производительность и КПД процесса, по сравнению с реакторами раздельного типа [2]. Открытые сильноточные дуговые разряды ( $I > 200$  А) имеют более высокие температуры в ядре плазменного канала и соответственно более высокие плотности мощности радиационного излучения, чем

в плазменных струях, что позволяет значительно интенсифицировать процесс теплообмена за счет переноса лучистой составляющей излучения дугового разряда. Известно, [5] что среднemasсовая температура нагрева частиц угля определяется – молекулярной, электронной и лучистой теплопроводностями. При молекулярной теплопроводности основным переносчиком тепла являются молекулы газа, а коэффициент молекулярной теплопроводности слабо зависит от температуры  $\chi \approx \sqrt{U(T)}$ . Электронная теплопроводность, где электроны являются основными носителями тепла, зависит от температуры уже степенным образом  $\chi \approx [U(T)]^{2,5}$  и значительно сильнее зависит от температуры коэффициент лучистой составляющей  $\chi \approx [U(T)]^{6,5}$ .

Создание активной зоны гетерогенного реагирования углерода может быть достигнуто при непосредственном горении сильноточного дугового разряда в замкнутом объеме водоугольной суспензии, где взаимодействуя с внешним магнитным полем, вращающийся разряд способствует интенсивному перемешиванию частиц топлива и увеличению времени пребывания их в реакционной зоне. Ощутимый эффект может быть достигнут при создании развитой поверхности реагирования водоугольной суспензии с высокотемпературной зоной дугового разряда путем ее распыла в том же замкнутом объеме. Важным свойством водоугольной суспензии при этом является сохранение в распыленном состоянии всех исходных её характеристик. Частица, состоящая из угля и воды, попав в высокотемпературную среду, претерпевает ряд превращений, приводящих к увеличению её реакционной поверхности. Процессы, протекающие внутри частицы, активизируют поверхность реагирования. В этих условиях увеличение ее объема и поверхности реагирования происходит почти по линейному закону, и при температуре  $T = 1000$  К, достигает 33-кратной величины, что приводит к образованию сильно развитой удельной поверхности реагирования ВУТ, к увеличению реакционной способности топлива и суммарной скорости реакции [6].

При подаче ВУТ в распыленном виде в зону дугового разряда с температурой 3000-5000 °К процесс газификации происходит практически скачкообразно с увеличением в 3-4 раза скорости реакции окисления, обеспечивая при этом степень превращения углерода исходного сырья в газообразное состояние до 85-95% [7].

Для оценки концентраций синтез-газа ( $CO + H_2$ ), произведем термодинамический расчет равновесного состава реагирующих систем при различных параметрах состояния (температуре, давлении, коэффициенте избытка окислителя) процесса пароплазменной газификации. Расчеты выполнены в диапазоне изменения температуры 1500–4000 К, давления 0,1–0,5 МПа, коэффициента избытка окислителя  $\alpha = 0,2–1$ . Для расчета многокомпонентной гетерогенной системы была использована, отработанная для высокотемпературных процессов, универсальная программа термодинамических расчетов "АСТРА-4", основанная на фундаментальных законах термодинамики и законах сохранения массы, энергии и заряда [7]. Программа позволяет, для закрытых термодинамических систем, построить математическую модель образования в гетерогенной дисперс-

ной системе газообразных и конденсированных веществ, электронейтральных и ионизированных компонентов, находящихся в состоянии равновесия. Расчеты плазменно-дуговой газификации ВУТ произведем на базе угля марки «АШ-1» физико-химические характеристики, которого приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Физико-химические характеристики углей

Бассейн, тип угля	Элементный состав топлива, %							
	$W^p$	$A^p$	$S^p$	$C^p$	$H^p$	$N^p$	$O^p$	$V^e$
Донецкий, «АШ – 1»	7,5	18,96	1,55	68,02	1,47	0,59	1,91	3,5
Донецкий, «АШ – 2»	8,5	30,2	1,6	56,4	1,1	0,5	1,7	4,0
Львовско-волынский, «Г»	10,0	22,5	3,0	53,3	3,5	1,0	6,7	39,0
Кузнецкий, «Д»	12,0	13,2	0,4	58,6	4,2	1,9	9,7	42,0

На рис. 1 представлены результаты расчета равновесного состава газовой среды органической части угля и зольного остатка при  $\alpha=0,45$ .

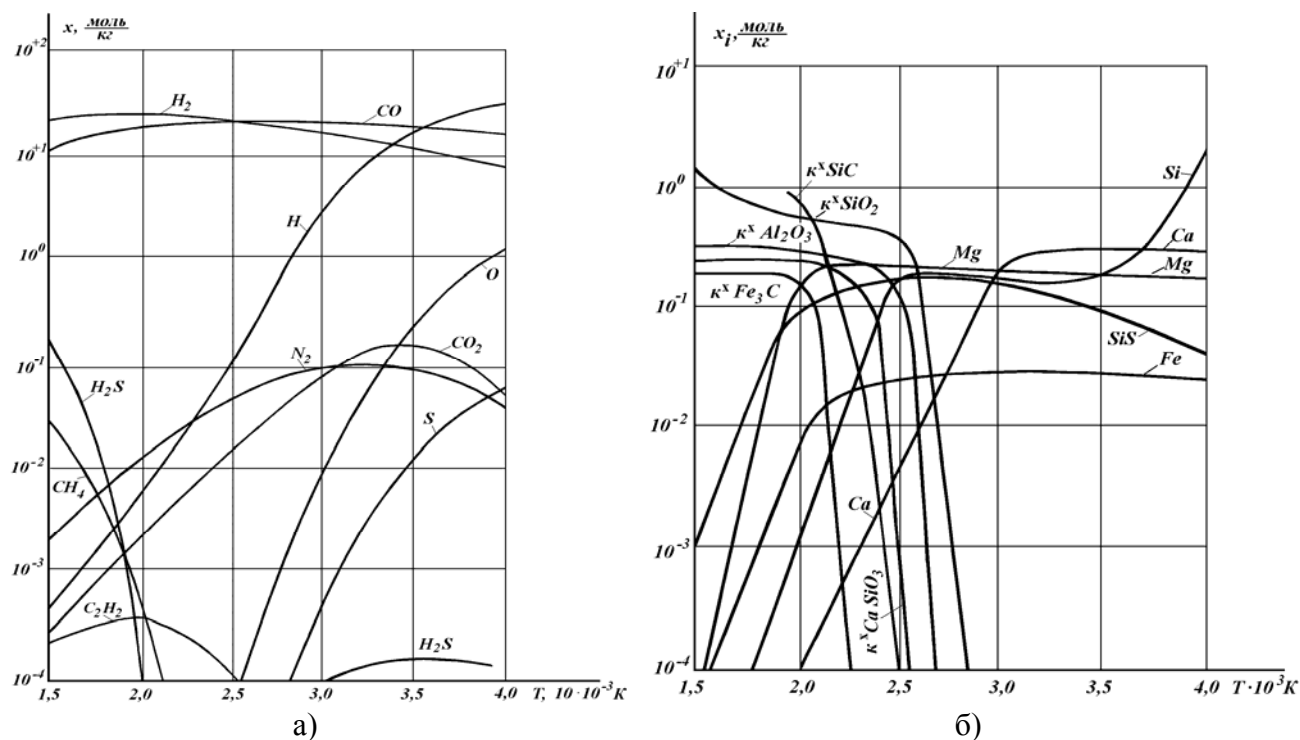


Рис. 1 - Равновесный состав газовой среды органической части угля (а) и зольного остатка (б)

Газовая фаза органической части угля при  $T=1500-3000$  °К (рис 1а) состоит в основном из  $H_2$  и  $CO$  концентрация которых достигает значений  $10^1$  моль/кг, а сам газ не содержит смол и углеводородов. Концентрация ацетилена  $C_2H_2$  и углекислого газа составляют соответственно  $10^{-4}$  и  $10^{-1}$  моль/кг. Окислы серы отсутствуют, а сера исходного угля представлена двумя соединениями  $H_2S$  и  $S$ . При температурах свыше 2200 °К остаются следы  $H_2S$  с концентрацией  $10^{-4}$  моль/кг. Содержание синтез-газа в газовой фазе достигает 92-95%.

При температурах процесса газификации до 2300 °К в конденсированных продуктах минеральной части (рис. 1б) присутствуют компоненты  $Fe_3C$ ,  $SiC$ ,

окислы алюминия  $Al_2O_3$  и кремния  $SiO_2$ . Следует отметить, что при температурах до 2000 °К в продуктах минеральной части образуются в конденсированной фазе  $SiC$ . С увеличением температуры процесса до 2500 °К образуется кремний ( $Si$ ). При температурах процесса свыше 3000 °К происходит восстановление окислов кремния, железа, кальция, магния и др. Очевидно, что при пароплазменной переработке угля появляется возможность управлять процессом получения ценных компонентов минеральной его части путем регулирования температуры процесса газификации.

Влияние коэффициента избытка окислителя  $\alpha$  на состав и выход продуктов плазменно-дуговой газификации ВУТ для угля марки «АШ» представлены на рис. 2.

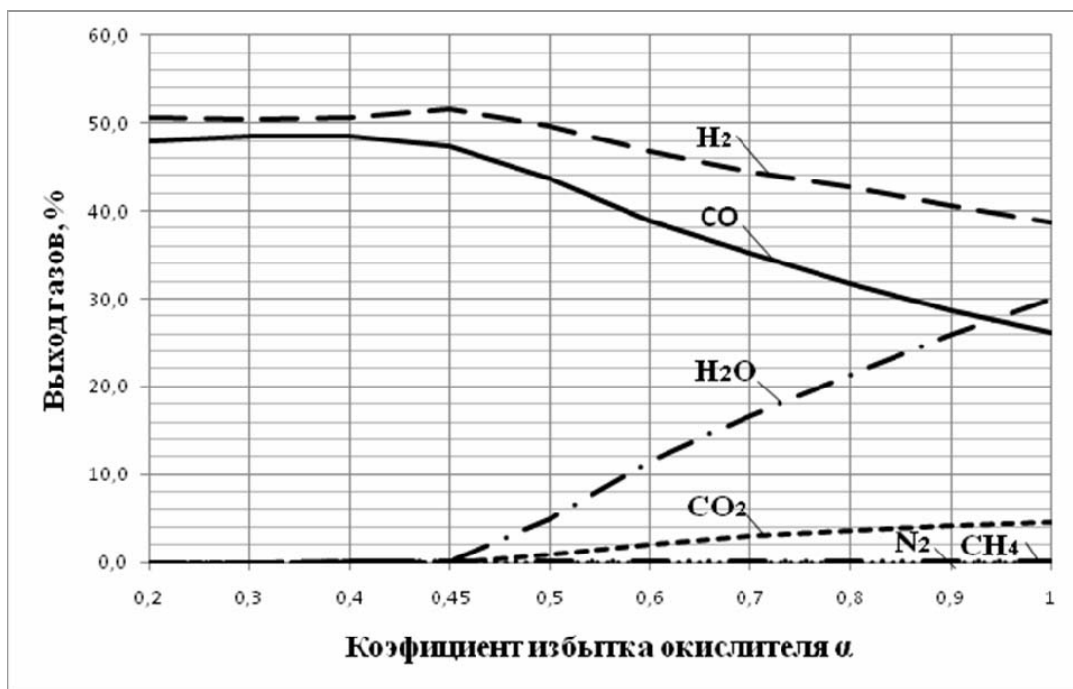


Рис. 2 – Выход продуктов газификации угля марки «АШ-1».

Установлено, что объемное содержание компонентов синтез-газа в газовой смеси имеет максимум при  $\alpha = 0,3-0,45$ . При  $\alpha > 0,45$  наблюдается падение выхода  $CO$  и  $H_2$  и растет объемное содержание водяного пара в выходных продуктах, что свидетельствует об излишках окислителя в выходных компонентах. Наибольшее процентное содержание целевого продукта в газовой фазе, содержится при  $\alpha=0,25-0,45$ . Но наибольший объемный выход газа при  $\alpha=0,45$ . При температурах 1500-2500 °К практически единственными компонентами синтез-газа, получаемого в процессе газификации ВУТ, являются  $H_2$  и  $CO$ . Содержание их в газовой фазе зависит от температуры процесса газификации, и достигают максимума 93-99% при температурах 1800-2000 °К (рис. 3).

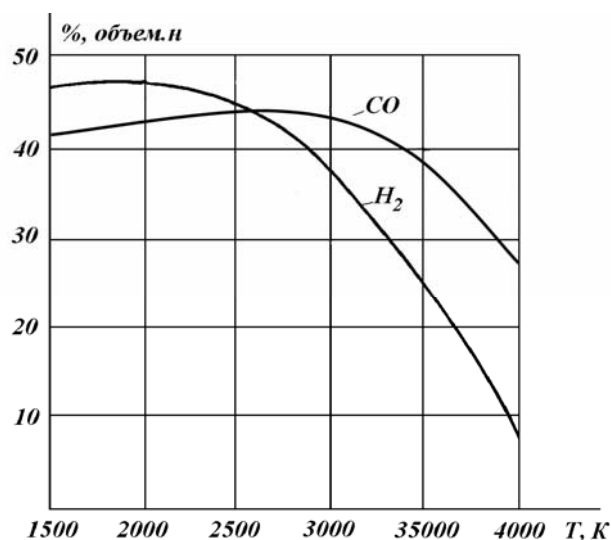


Рис. 3 - Зависимость компонентов синтез-газа от температуры при давлении  $P=0,1$  МПа и коэффициенте избытка окислителя  $\alpha=0,45$ .

Объектами исследования, кроме угля марки «АШ-1» были угли, физико-химические характеристики которых представлены в табл. 1.

Показатели пароплазменной газификации указанных углей представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Выход продуктов газификации углей с различными физико-химическими свойствами

Бассейн, Тип угля	Коэффициент избытка окис- лителя $\alpha$	Состав газа, $\frac{\text{нм}^3}{\text{кг угля}}$ %							$H_2/CO$
		$CO_2$	$CO$	$H_2$	$CH_4$	$H_2O$	$N_2$	$H_2+CO$	
Донецкий, «АШ – 1»	0,45	-	$\frac{1,27}{47,06}$	$\frac{1,39}{52,8}$	-	-	-	$\frac{2,66}{99,64}$	1,09
Донецкий, «АШ -2»	0,45	-	$\frac{1,05}{48,39}$	$\frac{1,11}{51,15}$	-	$\frac{0,01}{0,46}$	-	$\frac{2,16}{99,54}$	1,06
Львовско- волынский уголь «Г»	0,36	-	$\frac{0,99}{44,20}$	$\frac{1,23}{54,91}$	-	-	-	$\frac{2,22}{99,11}$	1,24
Кузнецкий, «Д»	0,35	-	$\frac{1,07}{43,85}$	$\frac{1,36}{55,74}$	-	-	-	$\frac{2,43}{99,59}$	1,27

Очевидно (табл. 2), что максимальная объемная доля целевых компонентов ( $CO+H_2>99\%$ ) получена при следующих значениях коэффициента избытка окислителя: для донецкого угля марки «А» -  $\alpha=0,45$ ; Львовско-волынского марки «Г» -  $\alpha=0,36$ ; кузнецкого угля марки «Д» -  $\alpha=0,35$ . В газовой смеси содержание компонентов ( $CO+H_2$ ) для всех углей примерно одинаково, хотя этот показатель получен при различных значениях  $\alpha$ . Инертные компоненты ( $CO_2, N_2$ ) в смесях отсутствуют.

Важным показателем процесса газификации является отношение  $H_2/CO$ . В нашем случае оно изменяется от 1,06 до 1,27. При этом, наблюдается следую-

шая закономерность; с ростом показателя  $H^p$  в элементарном составе исходного сырья повышается отношение  $H_2/CO$  в продуктах газификации. На величину отношения  $H_2/CO$ , по видимому, оказывает влияние выход летучих (см. таблицу 1). В этом случае наблюдается та же закономерность.

Для проверки правильности проведенных расчетов составлен материальный баланс (таблица 3) продуктов газификации угля «АШ-1. Предполагается, что минеральная часть угля при температуре газификации 1800-2200 К остается неизменной и вся переходит в шлак. Данные по выходу компонентов синтез-газа взяты из предварительно проведенных термодинамических расчетов выхода продуктов пароплазменной газификации приведенным выше. Масса компонентов полученного синтез-газа рассчитывалась по формуле:

$$m_i = \frac{V_i}{22,4} \mu_i$$

где  $V_i$  – объем компонента синтез-газа,  $m^3$ ;  $\mu_i$  – молярная масса компонента, кг/кмоль.

В табл. 3 приведены приход элементов с топливом и окислителем водяным паром из расчета на 1 кг угля. Расход определялся по химическим элементам, входящим в состав синтез-газа исходя из их молярной массы и по выходу смеси газов. Общая невязка баланса составляет  $0,01/1,95 \cdot 100 = 0,5$  %, что соответствует допустимой величине.

Влияние зольности топлива на процесс газификации сказывается следующим образом. Известно, что зольность угля вызывает снижение низшей теплоты сгорания, которая в значительной степени определяет возможность использования исходного сырья в качестве топлива. Тепловые условия в зоне газификации характеризуются температурой горения, которая, как функция низшей теплоты сгорания, понижается при увеличении зольности. Для снижения тепловых потерь и восстановления теплового баланса, для стабилизации процесса в зону газификации необходимо вводить дополнительное количество тепла. Это может быть достигнуто подогревом окислителя, рециркуляцией высокотемпературных продуктов газификации, применением высокотемпературных излучающих поверхностей или вращающегося электрического дугового разряда.

Рентгеноструктурным анализом угля АШ установлено, что минеральная его часть в основном состоит из  $SiO_2$  – 10,25 %,  $Al_2O_3$  – 4,74 %,  $Fe_2O_3$  – 2,96 % и незначительных концентраций  $CaCO_3$  – 0,93%,  $MgO$  – 0,69 %,  $K_2O$  – 0,69 %. Зольность угля находится в диапазоне 17-19 %. Состав шлака после традиционного сжигания угля, в основном, определялся молекулами –  $Fe_2O_3$  и  $SiO_2$ , а также незначительной концентрацией  $Al_2O_3$ .

Таблица 3 – Материальный баланс процесса газификации угля «АШ»

Статьи балан-са	C*		H		N		O		W		A	Сумма	
Приход													
Топ-ливо	0,6957		0,0147		0,0059		0,0191		0,075		0,18 96	1	
Окис-ли-тель H <sub>2</sub> O													
Нераз-лож									0,9			0,9	
Раз-лож			0,1				0,8						
Итого нераз-лож	0,6957		0,0147		0,0059		0,0191		0,975		0,18 96	1,9	
Итого раз-лож	0,6957		0,1147		0,0059		0,8191		0,075		0,18 96	1,9	
Расход													
Эле-мент	C*		H		N		O		W		A	Сумма	
	моль	кг	Мол ь	кг	Мо ль	кг	моль	кг	мол ь	кг	кг		кг
	56,66	0,67	63,2 23	0,12 6	0,2 1	0,006	57,1 24	0,91	2,40 2	0,04			1,76 7
Шлак											0,18 96		0,18 9
Итого		0,67		0,12 6		0,003		0,91		0,04	0,18 96		1,94
Невяз-ка		+0,00 57		- 0,01 1		+0,0 03		- 0,09 1		+0,0 29			- 0,04
Расход													
Газ	N <sub>2</sub>		CO <sub>2</sub>		CO		H <sub>2</sub>		H <sub>2</sub> O		A	Сумма	
	М <sup>3</sup>	кг	м <sup>3</sup>	кг	м <sup>3</sup>	кг	м <sup>3</sup>	кг	м <sup>3</sup>	кг	кг	м <sup>3</sup>	кг
	0,004 7	0,006	0	0	1,2 7	1,59	1,39	0,12 5	0	0			2,6 7
Шлак											0,18 96		0,1896
Итого	0,004 7	0,006	0	0	1,2 7	1,59	1,41 62	0,12 6	0	0	0,18 96	2,6 7	1,91
Невяз-ка													0,01

\* - с учетом серы.

Для сравнения, при традиционном горении угля АШ в составе шлака находится 20–30 % не сгоревшего углерода. После плазменной газификации состав шлака отличается полным отсутствием в его составе углерода и формируется



он, в основном, молекулами  $Al_2SiO_5$  и  $Fe_2O_3$ . Наличие этих молекул в его составе и полное отсутствие углерода предполагает использование шлака в индустрии строительных материалов.

Обобщая изложенное, можно предположить, что плазменно-дуговая газификация ВУТ, развиваясь как технология, является наиболее перспективной ввиду высокой интенсивности процесса, обуславливающую ее высокую производительность в газогенераторах большой единичной мощности. Она может обеспечить минимальное загрязнение окружающей среды, высокую калорийность получаемого синтез-газа за счет увеличения в нем составляющей – водорода и возможности организации комплексной безотходной технологии переработки угля и угольных отходов. Плазменно-дуговая газификация ВУТ позволяет так же перерабатывать без предварительного осушения глубокообводненные отходы углеобогащения и исключает из технологии дорогостоящий кислород.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Георгиев, И.С. Влияние температуры и состава среды на энергозатраты при плазменной газификации бурых углей различного качества [Текст] / И.С. Георгиев, Б.И. Михайлов // Изв. Сибирского отделения АН СССР. - 1987. – Вып. 4. - № 15. – С.83-89.
2. Ибраев Ш.Ш. Взаимодействие плазмы с измельчённым материалом в плазменных реакторах [Текст] / Ш.Ш. Ибраев // Генераторы низкотемпературной плазмы. Тезисы докл. Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. – Новосибирск, 1989.–ч. 2. - С. 249-250.
3. Колобова, Е.А. Газификация углей и шлама гидрогенизации в плазме водяного пара [Текст] / Е.А. Колобова // Химия твердого топлива. – 1983. – № 2 – С. 91-96.
4. Новиков, О.Я. Многодуговые системы [Текст] / О.Я. Новиков, П.И. Тамкиви, А.Н. Тимошевский. – Новосибирск: Наука, 1988. – 133с.
5. Змитренко Н.В. Явление инерции тепла. [Текст] / Н.В. Змитренко, А.П. Михайлов // В кн. Компьютеры, модели, вычислительный эксперимент. Под ред. А.А. Самарского. – М.: Наука, 1988. – 176 с.
6. Веденов А.А. Задачник по физике плазмы [Текст] / А.А. Веденов. – М.: Атомиздат, 1981. - 160 с.
7. Янговский Магнитогидродинамические генераторы / Е.И. Янговский, И.М. Толмач. – М: Наука, 1972. – 201 с.

**УДК 622.016.25:622.831.325.3.004.15**

Д-р техн. наук Б.В. Бокий  
(ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько»)

#### **СОЗДАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЕМ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДЕГАЗАЦИОННЫХ СКВАЖИН ПАО «ШАХТА ИМ. А.Ф. ЗАСЯДЬКО»**

Розглянуто можливості комплексного рішення проблеми оперативного керування процесом підвищення ефективності видобутку метану вугільних родовищ.

#### **CREATING AUTOMATIC CONTROL SYSTEM IMPROVEMENT DEGASIFICATION WELLS PC "MINE NAMED AFTER A.F.ZASYADKO"**

The possibilities of a complex solution to the problem of operational process control efficiency of extraction of methane from coal deposits.

В технологической схеме «поверхностная дегазация – утилизация метана» важнейшим вопросом является стабильность процесса транспортирования