

УДК 536.46:533.932:537.566

*Л.Т. Холявченко, В.Я. Осенний,
С.Л. Давыдов, Р.Н. Наривский*

**ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ
РАЗВИТИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ
ЧИСТЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
ПЕРЕРАБОТКИ НИЗКОСОРТНЫХ
УГЛЕЙ И ОТХОДОВ УГОЛЬНОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

*Институт геотехнической механики НАН Украины,
Днепропетровск, Украина*

Наведені результати термодинамічних розрахунків процесу газифікації та експериментальних досліджень плазмової переробки водовугільного палива (ВВП). Розроблена схема плазмо-дугового реактора, показана можливість створення екологічно чистих технологій для переробки вугілля низького гатунку та відходів вугільної промисловості.

Приведены результаты термодинамических расчетов процесса газификации и экспериментальных исследований плазменной переработки водоугольного топлива (ВУТ). Разработана схема плазменно-дугового реактора, показана возможность создания экологически чистых технологий для переработки низкосортного угля и отходов угольной промышленности.

По мнению многих ученых, на конференциях в Киото, Рио-де-Жанейро, Денвер, Женева и др., развитие дальнейшей цивилизации немислимо без создания эко-ресурсосберегающих и безотходных технологий переработки минерального сырья и снижения выбросов в атмосферу CO₂ в частности. Работы Института природопользования и экологии НАН Украины послужили основой для развития данного направления в ряде институтов и предприятий нашей страны.

Эко-ресурсосберегающие технологии в различных отраслях народного хозяйства и в частности в горной промышленности нашли свое отражение в разработках ИГТМ НАН Украины [1-4, 17, 23].

Энергетические ресурсы – основа экономической и политической независимости любого государства. В соответствии с прогнозами ИЕА, к 2030 г. уголь будет покрывать более трети мировой потребности в энергии [5], при этом прирост доли угля возрастает на 59%, а 81% этого прироста пойдет на выработку электроэнергии.

Внимание мировой энергетики сконцентрировалось на угольной отрасли еще с

начала 2000 г. и если добыча угля в мире достигла 4,6 млрд т, то Украина наоборот ее уменьшила.

Данные УкрНИИпроекта показывают, что среди всех запасов органического топлива, доля угля составляет 96% и его Украина может расходовать несколько столетий. Уголь – единственный в нашей стране энергоноситель, который имеет огромную ресурсную базу, он является гарантом экономической и политической независимости государства. Балансовые запасы угля в Украине (на 01.05.2005 г.) составили 8703,5 млн т., промышленные – 6500,8 млн т., а общие разведанные запасы угля составляют 117 млрд т. [6, 7]. Согласно данным УкрНИИобогащения на фабриках Минуглепрома в отстойниках и шламонакопителях находится более 115 млн т. шламовых продуктов, в которых содержится до 50% и более товарного угля. Анализ химического состава отходов хозяйственной деятельности шахт показывает, что задача их утилизации значительно облегчается в связи с наличием в них органических веществ (углерода), которые можно использовать в качестве энергоносителя [8, 9]. Перевод породных отвалов и угольных шламов в технологически приемлемое топливо позволит не только улучшить экологическую обстановку в регионах угольного производ-

© Холявченко Л.Т., Осенний В.Я.,
Давыдов С.Л., Наривский Р.Н., 2012

ства, но и получить существенный экономический эффект.

Переработка отходов угольной промышленности могла бы внести существенный вклад в энергетику Украины несмотря на большое разнообразие состава и свойств (физических, химических и технологических), которые обусловлены неоднородностью углеобразования в различных регионах. Они отличаются мацеральным, микролитотипным составом и степенью метаморфизма. Такое же отличие имеется и в отходах угольного производства. Более того, минеральная составляющая отходов представляет особый интерес из-за большого спектра ценных минералов, которые нужны для развития других отраслей народного хозяйства.

Шестая программа действий по охране окружающей среды ЕС определяет предотвращение образования отходов и обращение с ними как одно из четырех приоритетных направлений. Сократить количество отходов угольного производства можно за счет применения закладки выработанного пространства в шахтах, а переработку вести в подземных условиях, не выдавая их на гора и создавая отвалы.

Французские ученые разработали метод лазерной спектроскопии с временным разрешением и вынужденным пробоем для контроля отходящих газов при сжигании отходов в режиме реального времени [11, 12]. Этот метод позволил выявить и идентифицировать основные опасные для человека элементы (фтор, хлор, сера), а также Si, Ca, Al, Cr, Mg, Pb, Fe в летучих золах при очень слабой концентрации (10^{-6} г/г). Созданы термические плазменные технологии для витрификации летучих зол, получаемых из твердых отходов и D B D процессы для регистрации и обезвреживания соединений очень небольшой концентрации в промышленных отходящих газах [13, 14]. Оба этих метода исследованы в плазмохимической лаборатории под руководством профессора Дж. Амару и используются в промышленности. По мнению французских ученых плазменные процессы открывают новые пути для очистки газов, токсичных порошков, таких как летучие зола, уничтожения опасных отходов, а процессы, использующие дуговой разряд, являются очень гибкими технологиями применительно к большому разнообразию составов химических отходов.

В развитие безотходных экологических ресурсосберегающих технологий в нашей стране может внести особый вклад применение низкотемпературной плазмы, обладающей огромной концентрацией энергии в единице объема, высокой температурой, определяющей высокие скорости теплового воздействия на отходы угольного производства, обеспечивающей большие скорости химических реакций между компонентами плазмы, позволяющие создать новые эффективные технологические процессы и оборудование, которое характеризуется экономичностью с точки зрения материалоемкости, энергоемкости и экологической чистотой.

Основные направления комплексной переработки низкосортных углей и шламов представлены в работе [15], но они должны быть усовершенствованы за счет применения плазмохимических процессов [16, 17].

Прогрессивным направлением переработки угля по сравнению с уже известными методами, является пароплазменная газификация – наиболее полно отвечающая всем требованиям экологии и современного производства.

В ИГТМ НАН Украины разработан способ и плазменно-дуговой реактор для газификации углей различной степени метаморфизма, отходов углеобогащения и других минеральных углеродсодержащих сред.

В основу создания плазмохимических реакторов легли исследования процессов плазменной газификации углей, относящиеся к высокотемпературному термическому разрушению минеральных сред, которые определили пути интенсификации передачи энергии плазмы углеродсодержащим средам, в том числе углям различной степени метаморфизма [18-20]. К такому пути следует отнести создание локальных высокотемпературных зон разрушения, обладающих высокой плотностью мощности, 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 вы-

ходе синтез-газа с единицы массы угля, за счет диссоциации воды используемой в качестве окислителя.

Для оценки концентраций молекул синтез-газа (основных "энергетических" составляющих: окись углерода CO и водород H_2) произведен термодинамический расчёт газовых компонентов в зависимости от температуры, давления и коэффициента избытка окислителя α (методом приближения моделей к реальным параметрам) процесса плазменной газификации.

Термодинамические расчеты выполнены в диапазоне изменения температуры процесса газификации 1500 – 4000К, давления 0,1-0,5 МПа, коэффициента избытка окислителя $\alpha = 0,2-1$.

Для исследования многокомпонентных гетерогенных систем (уголь + минеральная часть + окислитель H_2O) была использована, отработанная для высокотемпературных процессов, универсальная программа термодинамических расчетов "АСТРА-4", основанная на фундаментальных законах термодинамики и законов сохранения массы, энергии и заряда. Программа позволяет для закрытых термодинамических систем построить математическую модель образования в гетерогенной многокомпонентной системе газообразных и концентрированных

веществ, электронейтральных и ионизированных компонентов, находящихся в состоянии равновесия.

Приведены термодинамические расчеты равновесного состава газа при плазменно-дуговой газификации угля марки "А" со следующей физико-химической характеристикой: содержание углерода – $C^P = 68,02\%$; водорода - $H^P = 1,47\%$; азота - $N^P = 0,59\%$; кислорода - $O^P = 1,91\%$; серы - $S_{дл}^P = 1,55\%$; зольность - $A^P = 18,96\%$; влагосодержание - $W^P = 7,5\%$.

В результате расчетов установлено, что при $\alpha=0-1$ теоретическая температура газовой смеси в реакционной камере падает от температуры электрической дуги до температуры реакции при стехиометрическом соотношении компонентов топлива. Объемное содержание компонентов синтез-газа ($CO+H_2$) в газовой смеси имеет максимум при $\alpha = 0,45$. При $\alpha > 0,45$ наблюдается падение значений CO и H_2 и рост в продуктах газификации объемного содержания водяного пара.

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

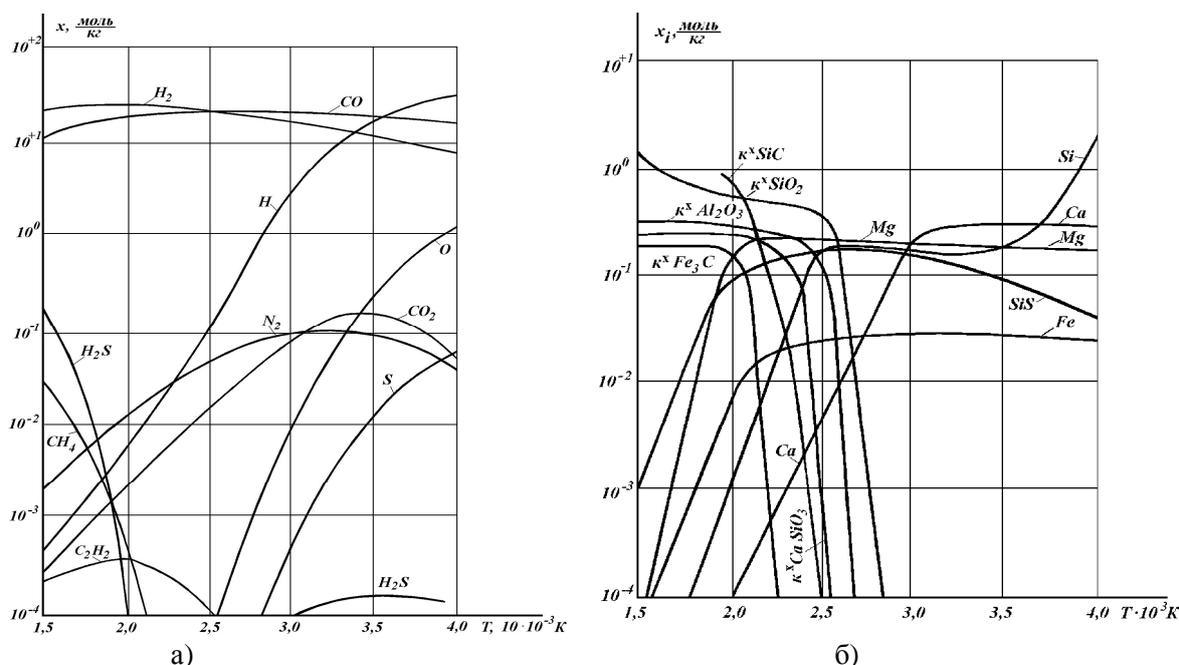


Рисунок 1 – Равновесный состав газовой среды органической части угля (а) и зольного остатка (б)

Как видно из рисунка 1 газовая фаза органической части угля при $T = 1500-3000$ К 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 2300К в конденсированных продуктах минеральной части присутствуют ценные компоненты $\kappa^x Fe_3C$, $\kappa^x SiC$, окислы алюминия $\kappa^x Al_2O_3$ и кремния $\kappa^x SiO_2$. Следует отметить, что при температурах до 2000К в продуктах минеральной части образуются в конденсированной фазе $\kappa^x SiC$. С увеличением температуры процесса до 2500К не происходит образование карбида кремния (SiC),

а образуется кремний (Si). При этом появляется возможность управлять процессом получения ценных компонентов минеральной части угля путем регулирования температуры процесса газификации.

При температурах процесса свыше 3000К массовая доля конденсированных продуктов α равна нулю, т.е., все компоненты минеральной части переходят в газовую фазу. Происходит восстановление окислов кремния, железа, кальция, магния и в газовой фазе находятся Fe , Si , Mg , Ca и др. При этом, чем выше содержание добавок воды к углю, тем меньше массовая доля конденсированных продуктов при умеренных температурах 1500-2000 К.

Исследование параметров процесса плазменной газификации водоугольного топлива производилось на экспериментальном стенде, функциональная схема которого представлена на рисунке 2, а внешний вид стенда на рисунке 3.

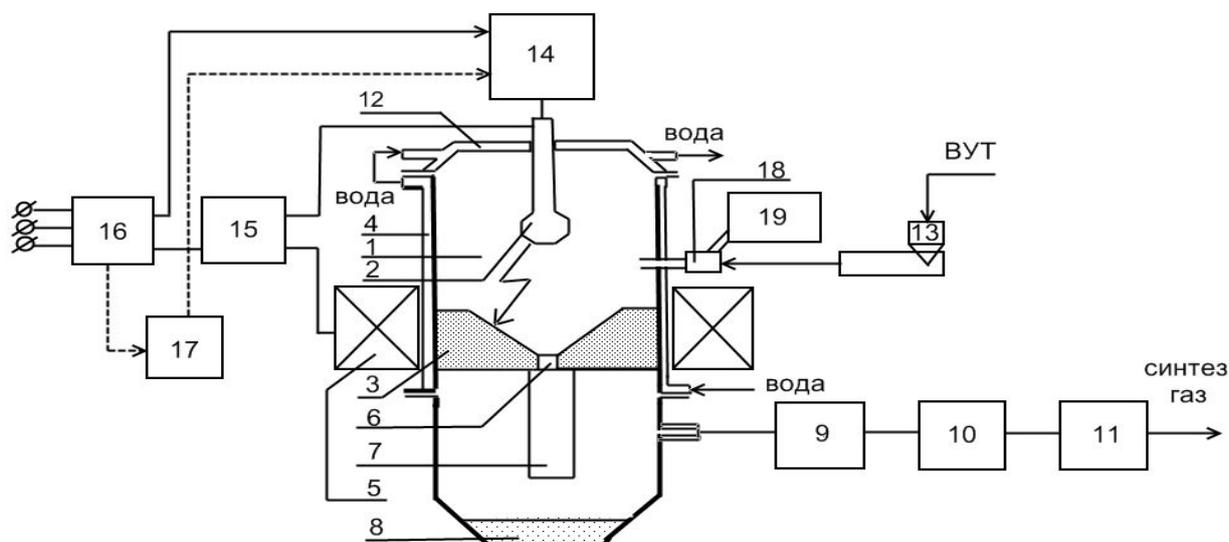


Рисунок 2 – Функциональная схема экспериментального образца проточного плазмохимического реактора для газификации водоугольного топлива: 1 – реакционная камера, 2 - катод, 3 – анод, 4 – корпус реакционной камеры, 5 – соленоид, 6 – диафрагма, 7 – окислительная камера, 8 – золоулавливатель, 9 – циклон, 10 – холодильник, 11 – расходомер газа, 12 – головка реактора, 13 – шнековый дозатор бункера, 14 – регулятор мощности (длины) дуги, 15 – преобразователь тока, 16 – блок питания реактора, 17 – блок управления, защиты и контроля электрических параметров реактора, 18 – эжектор, 19 – парогенератор.

Особенностью способа газификации, который разрабатывается ИГТМ НАН Украины, является применение экологически чистого энергоносителя – водоугольной суспензии. Это особенно актуально при утили-

зации отходов углеобогащения, высокая влажность которых обуславливает целесообразность изготовления на их основе водоугольного топлива.



Рисунок 3 – Экспериментальный образец плазмохимического реактора

Основой установки является плазменный реактор (1) совмещенного типа, представляющий собой закрытую цилиндрическую конструкцию по оси которого между стержневым катодом (2) и анодом днище (3) поджигается электрическая дуга – основной элемент теплового воздействия. Реакционная камера армирована жаропрочной конструкцией из графита. Электроды также выполнены из графита. Корпус реакционной камеры водоохлаждаемый из магнитопроницаемого материала. На внешней поверхности корпуса размещена катушка соленоида (5) предназначенная для создания постоянного магнитного поля. В аноде днище имеется отверстие-диафрагма (6) ведущее в камеру окисления (7) и золоотвод (8). Верхняя часть реактора закрывается водоохлаждаемой головной частью (12) по оси которой размещен подвижный катод (1), изолированный от головной части и реактора. Подвижность катода регулируется осевым его перемещением с помощью специального механизма подъема. Ввод топлива осуществляется шнековым питателем 13 с последующим его эжектированием в зону дугового разряда насыщенным паром с температу-

рой 100-110 °С, давлением 0,5-2МПа. Представляется возможным эжектирование проводить одним из нейтральных газов, CO₂ или же газами энергетической группы CH₄ и др. Синтез-газ, полученный в реакционной камере, через диафрагму в аноде-днище поступает в камеру окисления (6), где заканчиваются химические реакции. Из окислительной камеры (7) газ поступает в золоулавливатель (8), где проходит разделение газа и твердой минеральной части. В циклоне (9), куда газ поступает после золоулавливателя, очищается от механических включений. Охлаждение газа, до температуры окружающей среды, производится в холодильной камере (10). Запуск плазменного реактора и регулирование его мощности осуществлялась регулятором мощности (14) путем изменения длины дугового разряда и соответственно тока дуги. Процесс газификации проходит при температурах 1800-2200К и атмосферном давлении.

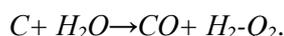
Основные компоненты получаемого синтез-газа при плазменно-дуговой газификации ВУТ представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Состав газа при плазменно-дуговой газификации ВУТ

Состав исходного сырья ВУТ	Соотношение ком-понентов $C:H_2O$	Состав газа			H_2/CO
		H_2 , %	CO , %	H_2+CO , %	
АШ+H ₂ O	1:0,9	55	40	95	2,43

Как видно из представленной таблицы 1, получаемый синтез-газ (H_2+CO) имеет повышенное содержание водорода, что объясняется природой окислительного агента –

H_2O , и термодинамическим состоянием реагирующей системы уголь-водяной пар при температуре свыше 2000 К, где имеет место одна из трех основных реакций:



Регулированием соотношения компонентов ВУТ представляется возможным получать газ с заданными физико-химическими характеристиками.

Рентгеноструктурный анализ углей и углеродосодержащего сырья (шламов) проводили на дифрактометре «ДРОН-3». Съемка образцов проводилась в монохроматизированном $Co-K$ излучении при одинаковых

условиях съемки. Расчет рентгеноструктурных параметров НМО углей и шламов проводился по методике описанной в работе [21].

Рентгеноструктурным анализом исследовался минеральный состав угля АШ, состав золы после традиционных методов сжигания углей и состав золы после плазменной газификации (см. рисунок 4).

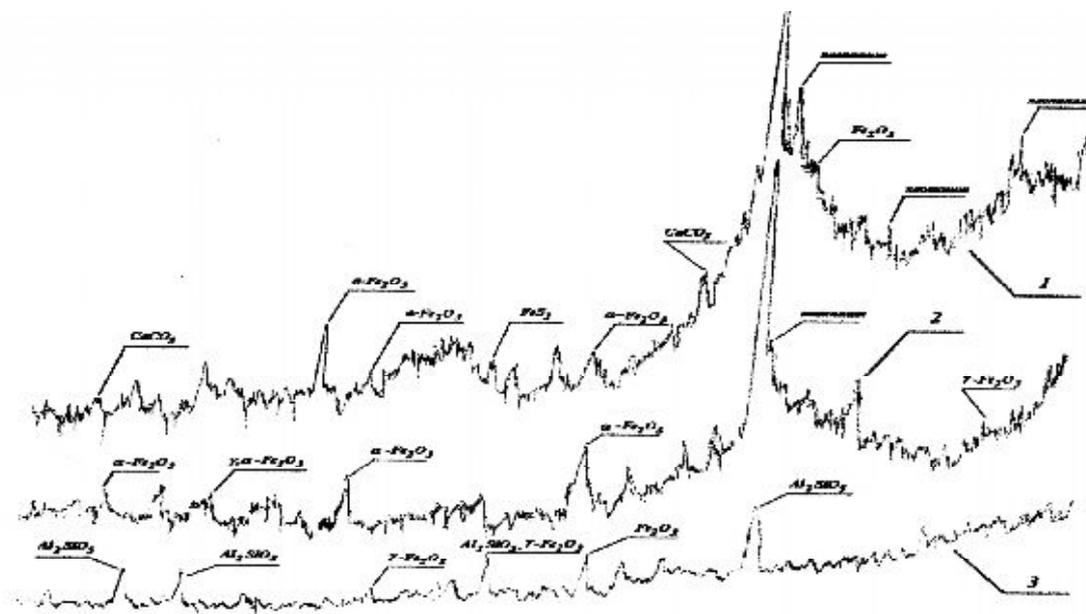


Рисунок 4 – Рентгеноструктурный анализ минеральной части угля АШ и шлака после газификации: 1 – зольная часть угля АШ; 2 – состав шлака после традиционного процесса сжигания угля АШ; 3 – состав шлака после плазменной газификации угля АШ

Как видно из рисунка 3, минеральная часть угля АШ 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 %, то есть зольность угля находилась в диапазоне 17-

19 %. Состав шлака после традиционного сжигания угля, в основном, определялся молекулами γ и $\alpha - Fe_2O_3$ и SiO_2 , а также незначительной концентрацией Al_2O_3 .

Для сравнения, при традиционном горении угля АШ в составе золы находится 20 –

30 % не сгоревшего углерода. После плазменной газификации состав золы отличается полным отсутствием в его составе углерода. Формируется зола, в основном, молекулами Al_2SiO_5 и $\gamma - Fe_2O_3$. Наличие этих молекул в его составе и полное отсутствие углерода предполагает использование золы в индустрии строительных материалов.

С целью более эффективного использования твердых горючих ископаемых в различных процессах конверсии, для оценки их технологических характеристик в ИГТМ НАН Украины были проведены исследования по выходу продуктов полукоксования шламов и углей Львовско-Волинского бассейна [22, 23], которые показали возможность повысить энергетическую эффективность переработки твердых горючих ископаемых и уменьшить выбросы вредных веществ в окружающую среду.

Методом дериватографии исследована деструкция твердых топлив (угля различ-

ной степени метаморфизма – $C^{daf} = 76,6-84,3\%$). Определены температурные интервалы и температуры максимума основного разложения и прослежен ход термодеструкции в интервале температур 200-900⁰С. Пиролиз углей и шламов осуществлялся в закрытой системе без давления. Найдена количественная взаимосвязь между данными дериватографии и пиролиза. На основании данных рентгеноструктурного анализа предложены возможные пути трансформации надмолекулярной организации (НМО) угля. Оценка структурно-химических превращений угля при нагревании позволила проследить основные пути трансформации его НМО и охарактеризовать с целью оптимизации технологического процесса получения полукокса и синтез-газа.

На рисунке 5 представлена дифрактограмма твердого остатка шлама, прошедшего плазменные процессы в реакторе.

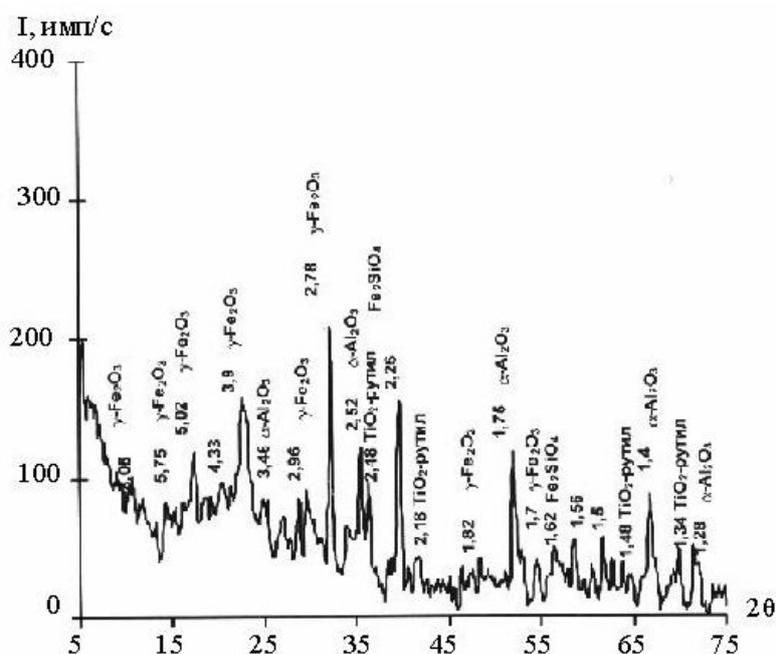


Рисунок 5 – Дифрактограмма твердого остатка шлама, прошедшего плазменные процессы в реакторе

Из рисунка 5 видно, что алифатическая составляющая шламов полностью извлечена при получении синтез-газа, а твердый остаток может быть использован в качестве строительных материалов.

Обобщая изложенное выше 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 состав-

ляющей – водорода и возможности организации комплексной безотходной технологии переработки отходов. Плазменная дуговая газификация ВУТ позволяет так же

перерабатывать без предварительного осушения глубокообводненные отходы углеобогащения и исключает из технологии дорогостоящий кислород.

Перечень ссылок

1. Создание экологически чистых плазменных технологий при обработке материалов / А.Ф. Булат, Б.Д. Алымов, В.Я. Осенний [и др.]. // Проблемы природокористування, сталого розвитку та технологічної безпеки регіонів: матеріали третьої Міжнародної науково-практичної конференції, Ч.ІІ, 03-08 жовтня 2005 р. – Дніпропетровськ, 2005. – С. 180-182.
2. Разработка электродуговых генераторов водяной плазмы для создания экологически чистых технологий / А.Ф. Булат, Б.Д. Алымов, В.В. Шумриков [и др.]. // Екологія і природокористування: Збірник наукових праць Ін-ту проблем природокористування та екології НАН України. – Вип. 8. – Дніпропетровськ, 2005. – С. 98-104.
3. Макеев С.Ю. Экологически чистые электроразрядные методы разрушения горных пород / С.Ю. Макеев, В.Я. Осенний, В.И. Емельяненко // Екологія і природокористування: Збірник наукових праць Ін-ту проблем природокористування та екології НАН України. – Вип. 14. – Дніпропетровськ, 2011. – С. 185-192.
4. Приходченко В.Л. Экологические проблемы организации термопереработки угольных шламов / В.Л. Приходченко, В.Я. Осенний, Н.В. Коваль // Проблемы природокористування, сталого розвитку та технологічної безпеки регіонів: матеріали п'ятої Міжнародної науково-практичної конференції, 06-09 жовтня 2009 р. – Дніпропетровськ, 2009. – С. 133-135.
5. Глюкауф. – 2010. - №4. - С.10-11.
6. Алавердян Л.Н. Институциональные преобразования в угольной промышленности / Л.Н. Алавердян // Уголь. - 2009. - №7. - С.14-18.
7. Полтавец В.И. Альтернативы реформирования угольной промышленности / В.И. Полтавец, Б.А. Грядущий, Г.Л. Майдуков // Уголь. - 2008. - №7. - С.10-16.
8. Мнухин А.Г. Породные отвалы – сырье будущего / А.Г. Мнухин // Уголь. - 2009. - №5. - С.28-32.
9. Бобров А.Г. Террикон – это техногенное полезное ископаемое / А.Г. Бобров // Уголь Украины. – 2000. - №1. - С.25-30.
10. Брик Д.В. Газифікація некондиційного вугілля Львівсько-Волинського басейну / Д.В. Брик, Ю.В. Стефанік // Углекимический журнал. - 2010. - №1-2. - С.20-32.
11. Amouroux J., Lancelin H., Cjulibaly K. et al. // Proc/ of the 1st World Congress on Microwave Processing / Orlando, Florid, Californie. - 1997. - Vol.80. - P.565-575.
12. Morel S., Adam P., Amouroux J. // Progress in Plasma Processing of Materials / Ed. P. Fauchais. NewYork: Begell House; Wallingford. - 2001. - P.11-22.
13. Rosseeau P., Cavadias S., Amouroux J. // High Temperature Material Processes. - 2003. - Vol.7 №2. - P.391-405.
14. Rosseeau P., Gennet F., Cavadias S. et al. // Progress in Plasma Processing of Materials // NewYork: Begell House; Wallingford. - 2001. - P.785 - 792.
15. Выбор направления комплексной переработки бурых углей / С.И. Шахадыец, Л.В. Бутхарейт, М.М. Савинов [и др.]. // Уголь Украины. - 1996. - №4. - С.5-7.
16. Исследование влияния плазмохимической активации горения на аэродинамические и тепловые характеристики топочной камеры / А.С. Аскарлова, Е.И. Лаврищева, В.Е. Мессерле [и др.]. // Известия НАН РК. Серия физико-математическая. - 2006. - №6. - С.19-25.
17. Осенний В.Я. Плазмохимические процессы при переработке отходов углеобогачительных фабрик / В.Я. Осенний, Э.С. Ключев, С.Л. Давыдов // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва: науково-виробничий збірник. – Кременчук: КДУ. – 2010. - №11. – С.112-120.
18. Георгиев И. Влияние температуры и состава среды на энергозатраты при плазменной газификации бурых углей различного качества. / И. Георгиев, Б.И. Михайлов // Известия Сибирского отделения АН СССР, серия технических наук. –1987. - № 15, вып. 4. – с. 83-89.

19. Ибраев Ш.Ш. Взаимодействие плазмы с измельчённым материалом в плазменных реакторах / Ш.Ш. Ибраев // Генераторы низкотемпературной плазмы: тезисы докл. всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. – Новосибирск. - 1989. –ч. 2. - с. 249-250.
20. Колобова Е.А. Газификация углей и шлама гидрогенизации в плазме водяного пар / Е.А. Колобова // Химия твёрдого топлива. –1983. - № 2. – с. 91-96.
21. Саранчук В.И. Надмолекулярная организационная структура и свойства угля / Саранчук В.И., Айруни А.Т., Ковалев К.Е. – К.:Наукова Думка, 1988. - 192 с.
22. Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках / Приходченко В.Л., Слащева Е.А., Осенний В.Я. [и др.]. // Материалы Юбилейной XX Международной научной школы. - Симферополь: Таврический Национальный Университет, 2010. - С.293-295.
23. Энергетическая переработка низкосортных углей и отходов углеобогащения / А.Т. Курносов, В.А. Приходченко, В.Я. Осенний [и др.]. // Геотехническая механика: сб. науч. трудов.- 2010. - №88. - 198с.

*L.T. Kholiyavchenko, V.Ya. Osenniy,
S.L. Davydov, R.N. Narivskiy*

**THE ISSUE AND THE DEVELOPMENT
PERSPECTIVE OF POLLUTION-FREE
PROCESSING TECHNOLOGIES OF THE
POOR COAL AND WASTE OF COAL IN-
DUSTRY**

*Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine named after
N. S. Polyakov, Dnipropetrovsk, Ukraine*

The results of searching of plasma processing of coal-water fuel (WCF). The results of thermodynamic calculations of gasification process of the WCF. The scheme of the plasma-arc reactor is developed, which provides a significant intensification of heat and mass transfer. The possibility of creating pollution-free technologies for the processing of poor coal and waste of coal industry.

*Надійшла до редколегії 10 жовтня 2011 р.
Рекомендовано членом редколегії канд. техн. наук П.І. Копачем*