

Академик НАН Украины А.Ф. Булат,
канд. физ-мат. наук В.В. Шумриков,
канд. техн. наук Б.Д. Алымов,
канд. техн. наук Л.Т. Холявченко,
докт. техн. наук Л.М. Васильев
(ИГТМ НАН Украины)

ПЛАЗМЕННАЯ ГАЗИФИКАЦИЯ ВОДО-УГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ

У результаті проведених комплексних досліджень плазмової газифікації водо-вугільного палива (ВУТ) встановлено, що ефективність процесу газифікації повністю визначається фізико-хімічними параметрами складу вугілля, енергетичними характеристиками дугового розряду і способом введення енергії плазми. Одержано синтез-газ з підвищеним вмістом водню та показана принципова можливість одержання синтез-газу з заданими фізико-хімічними характеристиками.

THE PLASMA GASIFICATION OF COAL-WATER FUEL

As a result of the spent complex researching of the plasma gasification of coal-water fuel there are determined that the gasification passing efficiency is completely defined by the physicochemical parameters of coal structure, the power characteristic of arc discharge and the plasma power supplying method. The synthesis-gas is received with the high content of hydrogen and the key opportunity of reception of synthesis-gas with the given physicochemical performances is shown.

В настоящее время, в связи с ограниченностью запасов природных ресурсов (нефти, газа) в Украине становится перспективным разработка новых направлений экологически чистых технологий переработки твердых горючих ископаемых, с целью получения газообразного топлива, используемого в дальнейшем – как в качестве энергетического заменителя природного газа, так и в качестве базового источника газообразных элементов для получения метанола и моторного топлива [1].

Одним из современных и перспективных способов переработки твердых органических углеводородов для получения газообразного топлива (в том числе углей различной степени метаморфизма и зольности) является процесс газификации. Основными газовыми ингредиентами газификации являются – водород, оксид углерода и двуокись углерода, определяющие суммарную теплотворную способность получаемого синтез – газа [1].

Классификация технологий, основанных на различных способах получения синтез – газа, предполагает функционирование трех основных технологий газификации твердых топлив-газификаторов, принадлежащих различным поколениям.

К первой группе технологий газификации твердых органических топлив обычно относят промышленно освоенные процессы (технологии первого поколения), такие как Лурги, Винклера, Кошперс-Тотцека, на базе которых, путем их совершенствования, создаются более эффективные и экономичные технологии второго поколения (Pur-100, HTW, Пренфло, Тексако), относящиеся ко второй группе [2].

В третью группу входят разработки новых технологических процессов газификации, основанных на каталитических методах воздействий (Бергбау,

Форшунг-Маннесман Эксон, Battel, Ю-Гэс), а также на воздействиях высоких температур на угли. К этому классу относят газификацию в расплавах железа и солей (Сумимото металл, КНД, Эпсплайд Технолоджи) и целый класс технологий, основанных на использовании аллотропических эффектов воздействия (Коусон, Лурчи-Рургаз) [3].

В традиционных технологиях газификации углей (газификаторы первого и второго поколений), необходимая тепловая энергия для получения синтез-газа приобретает в газификаторах за счет сгорания части угля, что приводит к образованию в синтез-газе значительной доли концентрации диоксида углерода ~ 7–15 %, являющегося балластным ингредиентом конечного продукта [2].

Кроме того, процессы газификации углей в традиционных технологиях (с использованием газификаторов первого и второго поколений) сопровождаются выбросом в атмосферу оксидов азота, серы и золы, что в свою очередь ухудшает экологическую ситуацию.

Интенсификация традиционных процессов газификации твердых топлив в настоящее время связана с применением более высоких температур и давлений, позволяющих использовать для получения высококалорийного синтез-газа низкосортные и коксующие угли, и кроме того – сократить расход пара, увеличить удельную производительность реакторов – газификаторов и уменьшить содержание нежелательных примесей [2, 3].

В тоже время для устранения основных недостатков в технологиях первого и второго поколения газификаторов (низкие скорости конверсии угля, наличие в синтез-газе молекул N_nO_m и SO_2 и т.д.) в разработках технологий третьего поколения применяют качественно новые подходы, т.е. переходят от автотермических процессов к аллотермическим процессам. При этом кроме применения широкого класса катализаторов [3], используют дополнительное тепло, генерируемое либо в ядерных реакциях, либо используют энергию низкотемпературной плазмы [4].

Так, например, исследования параметров процессов плазменной газификации углей различной степени метаморфизма, выполненные в ИТФ СО РАН [5], КазНИИ [6], ИГИ СО РАН [7], ИГТМ НАНУ [8] показали следующие преимущества плазменной газификации перед традиционными способами: высокое качество получаемого синтез-газа; полное отсутствие выбросов оксидов азота, серы и других вредных соединений в окружающую атмосферу; исключение из технологических процессов кислорода; возможность реализации комплексной переработки сырья; высокую управляемость концентраций выходных ингредиентов.

К особенностям плазменной технологии газификации следует отнести тот факт, что данный способ может быть использован не только для переработки углей различной степени метаморфизма и различной зольности, но и для газификации водо-угольных топлив (ВУТ), а также для переработки широкого класса минеральных углеродосодержащих сред (в том числе отходов углеобогащения, шламов, отходов системы водоочистки, сланцев и др. видов).

Генерируемые высокие концентрации CO и H₂ в синтез-газе при плазменной газификации позволяют использовать их с одной стороны в качестве исходного сырья для получения метанола, моторного топлива и других жидких энергетических видов химических соединений [9], а с другой применять их в качестве рабочих сред в технологиях с топливными элементами для получения тепла и электричества [10].

В настоящее время процессы плазменной газификации осуществляют в плазмохимических реакторах, которые в зависимости от способа ввода угля в реакционную зону разделяются на реакторы раздельного и совмещенного типа [11], т.е. газификация угля осуществляется как в плазменной струе (плазмообразующем газе), так и непосредственно в открытой электрической дуге.

При использовании плазмохимического реактора совмещенного типа нагрев пылеугольного топлива происходит непосредственно в электрическом разряде, где частицы угля претерпевают интенсивный нагрев за счет передачи им энергии в результате теплопроводности, конвекции и излучения, что значительно увеличивает производительность и КПД процесса, по сравнению с производительностью и КПД реакторов раздельного типа [6].

В основу создания плазмохимических реакторов легли исследования процессов плазменной газификации углей, касающиеся высокотемпературного термического разрушения минеральных сред, которые определили пути интенсификации передачи энергии плазмы углеродосодержащим средам, в том числе углям различной степени метаморфизма [5–8].

Как было показано в [12] 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.

Как известно [12], открытые электрические дуги, имеющие высокие температуры в ядре плазменного канала и соответственно высокие плотности мощности радиационного излучения, чем в плазмообразующем газе (плазменных струях), позволяют значительно интенсифицировать процесс теплообмена за счет переноса излучения дуги угольным частицам.

Как известно, среднемассовая температура нагрева частиц для угля определяется – молекулярной, электронной и лучистой теплопроводностями [13].

В молекулярной теплопроводности основными переносчиками тепла в низкотемпературной плазме являются молекулы газа, а коэффициент молекулярной теплопроводности слабо зависит от температуры $\chi \approx \sqrt{U(T)}$. При электронной теплопроводности в низкотемпературной плазме свободные электроны являются основными носителями тепла, а электронная теплопроводность зависит от температуры уже степенным образом $\chi \approx [U(T)]^{2,5}$.

Значительно сильнее зависит от температуры коэффициент лучистой составляющей $\chi \approx [U(T)]^{6,5}$.

В этом случае уравнение теплопроводности (в отличие от линейного уравнения [13]) переписывается в виде:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \operatorname{div}(u^\sigma \operatorname{grad} u) - \gamma u(x, y, z, t) \quad (1)$$

т.е.

$$u_\tau = a^2 (u^\sigma \cdot u_x) - \gamma \cdot u(x, y, z, t) \quad (2)$$

где $a = \frac{\chi[U(T)]^n}{\rho c}$ - коэффициент температуропроводности, а $\gamma > 0$ - постоянная.

В уравнение (2) добавлен линейный второй член, определяющий сток тепла на частицу угля.

В формализованном виде уравнение (2) можно переписать в виде [13]:

$$u_\tau = \nabla \cdot (u^\sigma \nabla u) - \gamma u, \quad (3)$$

положив в это уравнение $u(t, x) = \exp(-\gamma t) V(t, x)$

где v - новая неизвестная функция. Тогда уравнение для V принимает вид:

$$\exp(\gamma \sigma t) V_\tau = \nabla(V^\sigma \nabla V) \quad t > 0 \quad x \in R^N$$

Вводя новую независимую переменную (время)

$$\tau = \tau(t) = \frac{1}{\gamma \sigma} [1 - \exp\{-\gamma \cdot \sigma \cdot t\}] \quad \tau \in \left[0, \frac{1}{\gamma \cdot \sigma}\right] \quad (4)$$

получаем для неизвестной функции $V = V(\tau, x)$ уравнение

$$V_\tau = \nabla(V^\sigma \nabla V)$$

частное решение которого хорошо известно [13], где для функции V вводится в свою очередь пробная функция $V_A(1 + \tau, x)$ и проводя обратные преобразования, получаем решение уравнения (3):

$$U(t, x) = \exp[-\gamma t] [g(t)]^{-N(N\sigma+2)} \left[\frac{\sigma}{2(N\sigma+2)} \cdot \left(\eta_0^2 - \frac{|x|^2}{[g(t)]^{\frac{2}{N\sigma+2}}} \right) \right]^{1/\sigma} \quad (5)$$

где $g(t) = 1 + \tau(t)$; $N, \eta_0 - \text{const}$; x - координата.

Выражение (5), являющееся решением уравнения (3) имеет поверхность вырождения на дине $|x(t)|$:

$$|x(t)| = \eta_0 \left[1 + \frac{1 - \exp(-\gamma \cdot \sigma \cdot t)}{\gamma \sigma} \right]^{1/N\sigma+2} \quad (6)$$

на которой поток тепла непрерывен.

Обобщенное решение (5) уравнения (3) показывает, что функция $u(t,x)$ монотонно возрастает и тепловые возмущения локализованы в ограниченной области пространства – в шаре радиусом r , равным радиусу частицы:

$$r = \lim |x(t)| = \eta_0 \left(1 + \frac{1}{\gamma \sigma} \right)^{1/N\sigma+2}$$

Сравнение решения нелинейного уравнения теплопроводности (5) и решение линейного показывает, что в случае если теплопроводность слабо зависит от температуры, то функция $u(t,x)$ монотонная, т.е. не претерпевает разрыва и распространяется по облучаемому объекту (в нашем случае частице угля) с постоянной скоростью.

Если же учитывать степенную зависимость коэффициента теплопроводности от температуры, то функция $u(t,x)$ на координате $|x(t)|$, терпит разрыв, т.е. при этом процесс формирования молекул CO и H_2 при газификации носит волновой, пульсирующий характер, что в свою очередь связано с проблемами управления протеканием процессов газификации и устойчивости горения дуги.

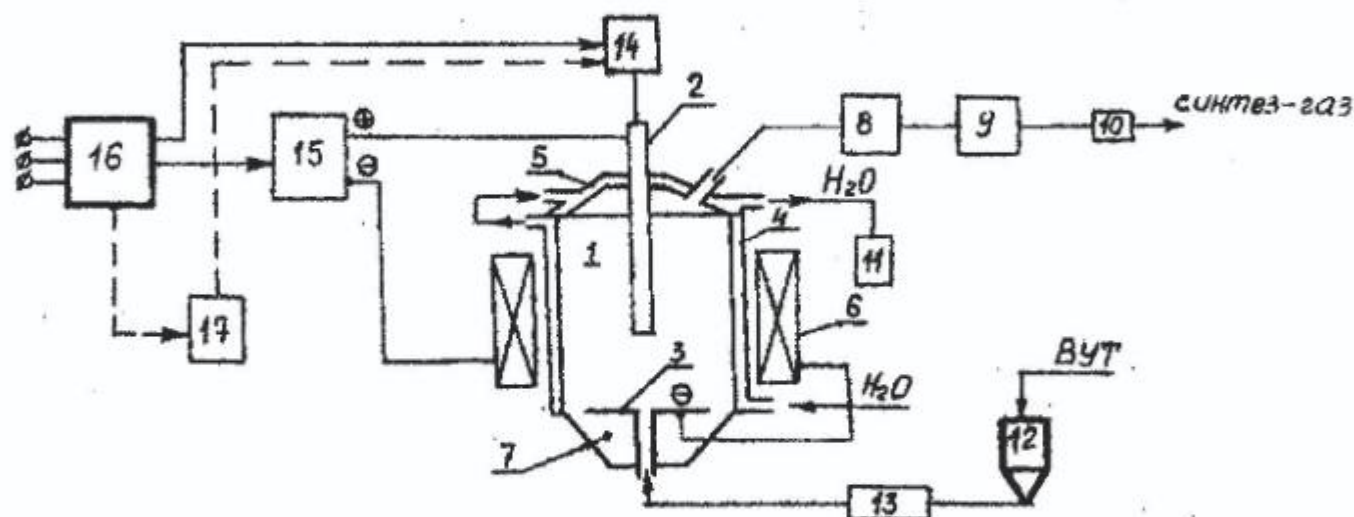
Таким образом математическое моделирование процесса термического нагрева твёрдой фазы показывает, что в результате увеличения тока дуги увеличивается лучистая электропроводность плазмы, что в свою очередь связано с увеличением концентрации свободных электронов и колебательных температур молекул CO , CO_2 и C_2 [12], энергетическое состояние которых и является интенсифицирующим фактором газификации.

Для интенсификации процесса газификации в реакторах совмещённого типа целесообразно использовать сильноточный электрический заряд, горящий в магнитном и электрическом полях. Перспективным направлением, в интенсификации процесса горения и газификации углей представляется использование неравновесной ионизации в зоне гетерогенного реагирования углерода при наличии твёрдофазного взаимодействия в ионизирующей присадке минеральной части угля (MgO , CaO , SiO_2 , K_2O , Al_2O_3), что на несколько порядков увеличивает проводимость плазменной суспензии по сравнению с равновесной проводимостью химически чистого газа при той же температуре [14].

Создание активной зоны гетерогенного реагирования углерода может быть достигнуто при непосредственном горении сильноточной электрической дуги в водоугольной суспензии. Открытые сильноточные ($I > 200A$) электрические дуги, имеющие более высокие, чем в плазменных потоках (струях), температуру в ядре канала, и соответственно высокой плотности поток радиационного излучения, позволяют интенсифицировать процесс теплообмена. При

температурах 6000–8000 К и выше доля лучистого теплообмена в общем энергетическом балансе дуги резко возрастает и при давлении 0,1 МПа эта величина составляет 70–95 % [15]. При горении открытой электрической дуги в замкнутом объёме в водяной плазме процессы тепломассобмена значительно интенсифицируются [16]. В «затопленном» дуговом разряде плотность энергии достигает значений 10^2 – 10^3 Вт/см² и на порядок выше плотности энергии в плазменных струях. Кроме того, охлаждение столба дуги, горящей в водоугольной суспензии, должно приводить к увеличению напряжённости электрического поля (при постоянном токе дуги) и электрической мощности плазмотрона, т.е. к частичному восполнению энергии плазмы и соответственно увеличению к.п.д. нагрева [17].

Данная схема обработки водоугольного топлива положена в основу создания модели плазмохимического реактора, функциональная схема которого представлена на рис. 1.



1 – реактор, 2, 3 – электроды, 4 – корпус реактора, 5 – крышка реактора, 6 – соленоид, 7 – шлакоборник, 8 – циклон, 9 – холодильник, 10 – газовый счетчик, 11 – коллектор слива воды, 12 – бункер, 13 – шнековый дозатор, 14 – регулятор мощности дуги, 15 – источник электропитания, 16 – блок питания реактора, 17 – блок управления, защиты и контроля электрических параметров

Рис. 1 – Функциональная схема устройства для плазмо-дуговой газификации БУТ

Реактор состоит из вертикальной водоохлаждаемой камеры (1), футерованной изнутри графитом, в нижней и верхних частях которой размещены электроды (2, 3). Снаружи камера реактора охвачена электромагнитной катушкой–соленоидом (6), включённым последовательно в цепь электропитания дуги. Электропитание реактора осуществляется от источника питания постоянного тока (15), полюса которого подсоединены к электродам.

Данная конструкция реактора позволяла осуществлять его работу как в циклическом режиме непосредственно с порционной загрузкой БУТ, так и в

непрерывном режиме – с постоянной подачей ВУТ в реактор–газификатор шнековым дозатором.

Методикой исследования процесса газификации ВУТ плазменно-дуговым способом предусматривалось выполнение следующих работ:

- установить принципиальную возможность газификации водо-угольного топлива при воздействии на него дугового разряда (горящего внутри водоугольной суспензии без ее распыла);

- определить режимные параметры плазмохимического реактора (напряжение дуги (U_d), ток дуги (I_d), длину дугового разряда (l_d), эффективную величину магнитного поля (B_d)), обеспечивающие максимальную производительность процесса газификации;

- определить концентрации ингредиентов синтез - газа и энергетические показатели процесса газификации.

В качестве исходного сырья использовались водо-угольные суспензии (уголь АШ + вода) в диапазоне изменения соотношений углерод – вода $C : H_2O = (1-2,5) : 1$.

Физико-химические характеристики угля АШ представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Физико-химические характеристики угля АШ

Уголь АШ	Зольность A^c , %	Выход летучих V^c , %	Влажность W^a , %	Сера общая $S_{общ}$, %	Углерод C_s , %	Водород H^c , %	Азот N^c , %	Кислород O^c , %	Теплота сгорания кДж/кг
	36	6,8	8	0,8	55	1,7	0,43	5,26	18

Исследования процесса газификации ВУТ проводились в диапазоне изменения мощности реактора 20-30 кВт, тока дуги 100-300А, индукции магнитного поля 0,03-0,08 Тл, напряжённости электрического поля дуги 30-50 В/см² с регистрацией режимных параметров – тока и напряжения дуги, давления и расхода образующего синтез-газа приборами и датчиками, расположенными на пульте управления установкой.

Одновременно осуществлялся контроль режимных параметров плазмохимического реактора и отбор специальным устройством генерируемого газа для анализа. Ингредиенты генерируемого газа (H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , H_2S , N_2) и их объёмные концентрации определялись методом газовой хроматографии с использованием газового хроматографа «Газхром 3101».

Установлено, что производительность процесса газификации, удельные энергозатраты зависят от плотности энергии в разрядной камере реактора, тока дуги, индукции магнитного поля, схемы воздействия дугового разряда на ВУТ. Наиболее эффективно процесс газификации ВУТ осуществляется вращающимся дуговым разрядом протекающим внутри водоугольной суспензии. В процессе экспериментов при постоянном объёме разрядной камеры длина дуги изменялась в пределах 10мм. При этом напряжение дуги (при индукции магнитного поля 0,03-0,06 Тл, в диапазоне изменения тока дуги 200-300А) изменялось в пределах 80-180В, а напряжённость электрического поля дуги находилось в диапазоне величин 30-60 В/см. Определены

минимальные значения плотностей энергии в разрядной камере реактора ($q = 0,15 \text{ кВт/см}^3$), индукции магнитного поля ($B \geq 0,06 \text{ Тл}$), обеспечивающих эффективный процесс обработки ВУТ. При рациональных режимах работы плазмохимического реактора – токах дуги 250-300А, напряжение на дуге 80-100В, индукции магнитного поля 0,06Тл энергозатраты на процесс газификации 1 кг угля составляют 2,7-3,8кВт·ч/кг при удельном выходе синтез-газа 1,4-1,6 м³/кг. При мощности реактора 24-30кВт его производительность составляла 9-11 кг/ч.

При этом, как показали исследования, в зависимости от режима воздействия дуги на ВУТ минеральная часть обрабатываемого топлива либо оставалась в реакторе в виде шлака, либо превращалась в газовую фазу, которая выносилась из реактора совместно с ингредиентами синтез-газа.

При обработке ВУТ невращающейся дугой (магнитное поле отсутствует $B = 0$) производительность процесса газификации резко падает и составляет 3кг/ч при токе дуги 250А и мощности реактора 24 кВт.

В режиме обработки ВУТ вращающейся электрической дугой, горящей над поверхностью водоугольной суспензии (при токе дуги 210А, напряжении 140В, индукции магнитного поля $B = 0,06 \text{ Тл}$) удельные энергозатраты процесса газификации составили 5-7кВт·ч/кг и в 1,8-2,0 раза превышают удельные энергозатраты при обработке ВУТ «затопленным» дуговым разрядом.

Результаты исследований газового состава синтез-газа (основных компонентов), образующегося в плазмохимическом реакторе представлены в таблице 2.

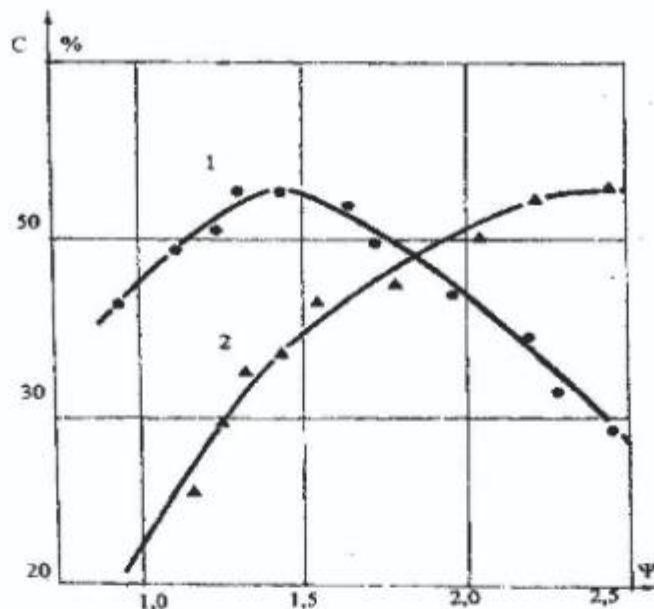
Таблица 2 – Режимы работы реактора и состав синтез-газа

Состав исходного сырья	Соотношение компонентов	Режимы работы реактора				Состав газа			H ₂ /CO
		U	I	P	L	H	CO	H ₂ +CO	
		В	А	кВт	мм	%	%	%	
АШ+H ₂ O	1,5:1	80	250	20	28	55	38	93	1,44
АШ+H ₂ O	1,3:1	60	280	16,8	16	44	28	72	1,57
АШ+H ₂ O	АШ+H ₂ O	80	260	20,8	20	28	55	83	0,5

Как видно из таблицы 2, полученный синтез-газ (H₂+CO) имеет повышенную концентрацию CO и H₂, которая в свою очередь зависела как от режимных параметров работы реактора, так и от массовых соотношений углерода и воды, и максимальный выход горючих компонентов (H₂+CO)

составил 93% (55% H₂ и 38% CO) при соотношении $\psi = \frac{m_C}{m_{H_2O}}$ (C:H₂O =

1,5:1,0). График зависимости концентраций H₂ и CO (в процентах) от ψ представлен на рисунке 2.



1 – концентрация H₂; 2 – концентрация CO

Рис. 2 – График зависимости концентраций ингредиентов синтез – газа от ψ

Из рисунка видно, что при изменении ψ в сторону уменьшения количества окислителя (H_2O) содержание водорода в генерируемом газе уменьшалось. Таким образом, путем регулирования предварительного состава и массовых соотношений ВУТ/ H_2O возможно получение синтез-газа с заданными (по составу) физико-химическими характеристиками.

Кроме того, в результате выполненных исследований были определены режимные параметры работы плазмохимического реактора и технико-экономические показатели процесса газификации ВУТ плазменно-дуговым способом:

- производительность процесса газификации (G), кг/ч	8 – 10
- удельные энергозатраты на процесс газификации 1 кг угля (W), кВт·ч/кг	2,7 – 3,8
- состав полученного синтез газа ($H_2 + CO$), %	55 H_2 , 38 CO
- плотность энергии в разрядной камере реактора, кВт/см ³	0,15 – 0,2
- напряженность электрического поля дуги (E), В/см	40 – 50
- индукция магнитного поля, Тл	0,06 – 0,08
- рациональное соотношение компонентов, уголь/ H_2O	1,5 : 1
- ток дуги	250 – 300А

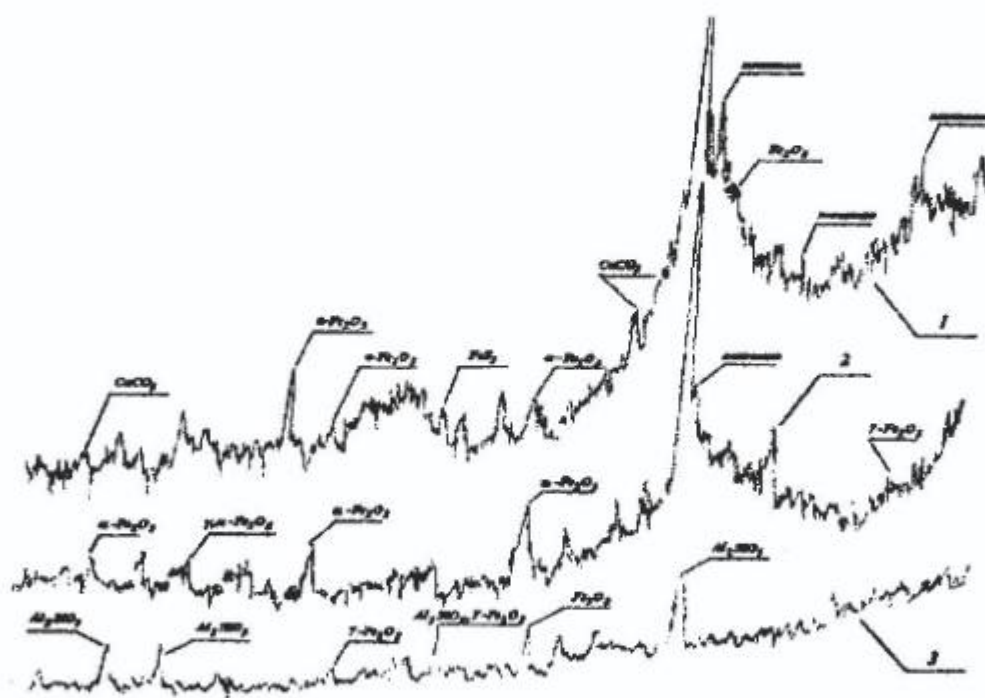
Проведенные исследования показали, что по сравнению с традиционными способами термической переработки твердых топлив (газификации), предложенный способ плазменной переработки углеродосодержащих ВУТ позволяет осуществить (кроме получения высокого содержания CO и H_2) чистый экологический процесс, без выбросов оксидов серы и азота в окружающую среду, что видно из таблицы 4.

Таблица 4 – Состав синтез – газа при различных процессах газификации

Процесс	Состав газа, объем %							
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	N ₂	H ₂ +CO	H ₂ /CO
Парокислородная газификация (по Копперс-Тотцеку) [2]	29,6	55,9	11,9	0,1	0,5	2,0	85,5	0,52
Плазменно-дуговая газификация водо-угольного топлива (АШ + H ₂ O)	55	38	2,0	1,0	-	-	93	1,44

Наряду с исследованиями, направленными на изучение состава и концентрации ингредиентов синтез – газа, в процессе эксперимента изучался химический состав шлака, образующегося в результате высокотемпературной конверсии твердых углеводородов после их обработки в открытом дуговом разряде.

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



1 – зольная часть угля АШ; 2 – состав шлака после традиционного процесса сжигания угля АШ; 3 – состав шлака после плазменной газификации угля АШ

Рис. 4 – Рентгеноструктурный анализ минеральной части угля АШ и шлака после газификации

Как видно из рисунка 4, минеральная часть угля АШ в основном состоит из SiO₂ – 18,22 %, Al₂O₃ – 8,42 %, Fe₂O₃ – 5,26 % и незначительных концентраций CaCO₃ – 1,66 %, MgO – 1,22 %, K₂O – 1,22 %, то есть зольность угля находилась в диапазоне 30 – 36 %. 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 .

В составе шлака при традиционном горении угля АШ обнаружена значительная концентрация не сгоревшего углерода $\sim 20 - 30 \%$.

После плазменной газификации состав шлака в основном определяется молекулами Al_2SiO_5 и $\gamma - Fe_2O_3$ и полным отсутствием в его составе углерода.

Наличие этих молекул в составе шлака угля и отсутствие углерода после плазменной газификации предполагает его использование при производстве строительных материалов, в частности, аглопирита – строительного материала, используемого для производства легких бетонов.

Таким образом, проведенные комплексные исследования плазменной газификации водо-угольных топлив позволяют сделать следующие выводы:

1. Физическое моделирование процесса газификации угольных частиц (уголь марки АШ) в составе водоугольного топлива показало, что эффективность протекания процесса газификации полностью определяется физико-химическим составом угля, энергетическими характеристиками дугового разряда и способом введения энергии плазмы ВУТ. При этом установлено, что наиболее перспективным способом введения энергии плазменной дуги есть способ по типу «затошленной» электрической дуги, горящей в водоугольной суспензии в электрических и магнитных полях.

2. Разработан и испытан образец плазмохимического реактора, который реализует способ газификации угля в высокотемпературной локальной зоне (2500–3000К) с плотностью энергии в разрядной камере реактора не менее $0,15 \text{ кВт/см}^3$. Определены его режимные и энергетические характеристики и технико-экономические показатели процесса газификации ВУТ плазменно-дуговым способом.

3. Показана принципиальная возможность получения синтез-газа с заданными физико-химическими характеристиками путём регулирования соотношения основных компонентов ВУТ – угля и воды. Получен синтез-газ с повышенным содержанием водорода (H_2), с теплотой сгорания $12,5-12,9 \text{ МДж/м}^3$. Максимальный выход горючих компонентов ($H_2 + CO$) составляет $96-95\%$ ($55 H_2$ и $38-40\% CO$) и превышает этот показатель для традиционных технологий, который составляет $85-87\%$.

4. По сравнению с традиционными способами переработки твёрдых топлив, предложенный способ переработки ВУТ позволяет осуществить экологически чистый процесс без выбросов оксидов азота и серы в окружающую среду с возможностью реализации комплексной переработки сырья с утилизацией его минеральной части.

Дальнейшие работы в данном направлении должны быть направлены на совершенствование конструкций плазмохимических реакторов с целью увеличения их ресурсных и энергетических характеристик, снижение удельных энергозатрат и создание экспериментальных и опытно-промышленных образцов плазмохимических реакторов, а также расширения класса использования нового вида водоугольного топлива, включая шламы, отходы горного производства и угольные отходы ТЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Химические вещества из угля. / Под ред. Ю. Фальба. – М.: Химия, 1980. – 614 с.
2. Корчевой Ю.П., Майстренко А.Ю., Топал А.И. Экологически чистые угольные электротехнологии. – К.: Наукова думка. – 2004. – 183 с.
3. Шиллинг Г.-Д., Бонн Б., Краус У. Газификация угля. – М.: Недра. – 1988. – 175 с.
4. Дьяконов А.Ф., Карпенко Е.И., Мессерле В.Е. Плазменно-энергетические технологии и их место в теплоэнергетике // Теплоэнергетика. – 1998. № 6. – С. 25-30.
5. Георгиев И., Михайлов Б.И. Влияние температуры и состава среды на энергозатраты при плазменной газификации бурых углей различного качества. // Известия Сибирского отделения АН СССР, серия технических наук. – 1987. № 15, вып. 4 – С. 83-89
6. Ибраев Ш.Ш. Взаимодействие плазмы с измельчённым материалом в плазменных реакторах. // Генераторы низкотемпературной плазмы. Тезисы докл. Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. – Новосибирск. – 1989. – ч. 2. – С. 249-250.
7. Колобова Е.А. Газификация углей и плазма гидрогенизации в плазме водяного пара. // Химия твёрдого топлива. – 1983. № 2. – с. 91-96.
8. Нетрадиционные технологические процессы добычи угля / Под ред. В.И. Потураева. – К.: Техніка, 1986. – 117с.
9. Производство технологического газа для синтеза аммиака и метанола из углеводородных газов. / Под ред. А.Г. Лейбуша. – М.: Химия, 1971. – 286 с.
10. Шумриков В.В. Высокотемпературная газификация углей под действием лазерного излучения. // Сб. научн. тр. – Дн-ск: Арт-пресс. – 1997. – с. 95-98
11. Новиков О.Я., Тимошевский А.Н., Таткиви П.И. и др. Многодуговые системы. – Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1988. – 133 с.
12. Шумриков В.В. Межфазный перенос при сублимации угля под действием лазерного излучения. Дисс. канд. физ.-мат. наук. – Одесса. – 1989. – 273 с.
13. Змитренко Н.В., Михайлов А.П. Явление инерции тепла. / В кн. Компьютеры, модели, вычислительный эксперимент. Под ред. А.А. Самарского. – М.: Наука. – 1988. – 176 с.
14. Самарский А.А., Еленин Г.Г., Змитренко Н.В. Горение нелинейной среды в виде сложных структур. // Докл. АН СССР. – 1977. т. 237, № 6. – С. 1330-1333.
15. Жуков М.Ф., Девятков Б.Н., Новиков О.Я. и др. Нестационарные процессы и радиационный теплообмен в термической плазме. / Теория термической электродуговой плазмы. – Новосибирск: Наука. – 1987. – ч. 2. – С. 140-141.
16. Булат А.Ф., Алымов Б.Д., Шумриков В.В., Осенний В.Я., Холявченко Л.Т. Разработка электродуговых генераторов водяной плазмы для создания экологически чистых технологий. // Экологія і природокористування. Сб. научн. тр. – Дн-ск. – 2005. вып. 8 – с. 98-104.
17. Жуков М.Ф., Девятков Б.Н., Новиков О.Я. и др. Нестационарные процессы и радиационный теплообмен в термической плазме. / Методы математического исследования плазмы. – Новосибирск: Наука. – 1987. – ч. 1. – С. 22-123.