

ПУТИ СОЗДАНИЯ ПАРОПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ГАЗИФИКАЦИИ НИЗКОСОРТНЫХ УГЛЕЙ И ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ

Проведено аналіз існуючих схем газифікації твердого палива. Наведені переваги та недоліки різних методів газифікації. Надано обґрунтування для подальшої розробки реактора з пароплазмової газифікації низькосортного вугілля та відходів вуглезбагачення.

THE WAYS OF CREATION THE STEAM PLASMA REACTORS FOR GASIFICATION OF THE LOW-GRADE COAL AND WASTE COAL

The analysis of the extant gasification schemes of solid fuel is realized. The advantages and shortages of different methods of gasification are resulted. The substantiation for post development of reactor with steam plasma gasification of the low-grade coal and waste coal is given.

Украина является энергетической державой, которая импортирует часть необходимых энергоносителей. Одновременно она обладает значительным количеством альтернативных источников энергии, использование которых смогло бы уменьшить энергозависимость. Учитывая ограниченность природных ресурсов нефти и газа в Украине, сегодня перспективной становится разработка альтернативных направлений переработки твердых горючих ископаемых в различные энергетические (синтез-газ) и моторные топлива, химические вещества и сырье для нефтехимического синтеза.

Одним из основных источников получения газа является термическая переработка угля – его газификация.

Газификация угля – производство горючего (технологического) газа при неполном окислении органической массы угля, имеет давнюю историю с периодами бурного развития и спадами. Впервые горючий газ из угля получил англичанин Мэрдок в 1792 г. как попутный продукт при производстве "свительного масла". К 50-м годам XIX в. практически во всех крупных и средних городах Европы и Северной Америки действовали газовые заводы для производства отопительного, бытового и свительного газа [1].

Процессы газификации классифицируются по следующим признакам:

- по теплоте сгорания получаемых газов (МДж/м³) - газы с низкой (4,18-6,70), средней (6,70 - 18,80) и высокой (31 - 40) теплотой сгорания;
- по назначению газов - для энергетических потребностей (непосредственного сжигания) и технологических целей (синтезы углеводородов, производство водорода, технического углерода) целей;
- по размеру частиц используемого топлива - газификация крупнозернистых, мелкозернистых и пылевидных топлив;
- по типу дутья - воздушное, паровоздушное, кислородное, парокислородное, паровое;
- по способу удаления минеральных примесей - мокрое и сухое золоудаление, жидкое шлакоудаление;

- по давлению газификации - при атмосферном (0,1 - 0,13 МПа), среднем (до 2-3 МПа) и высоком давлении (выше 2 - 3 МПа);

- по характеру движения газифицируемого топлива - в псевдостационарном опускающемся слое, в псевдоожигенном (кипящем) слое, в движущемся потоке пылевидных частиц;

- по температуре газификации - низкотемпературная (до 800°С), средне-температурная (800-1300°С) и высокотемпературная (выше 1300°С);

- по балансу тепла в процессе газификации - автотермический (стабильная температура поддерживается за счет внутренних источников тепла в системе) и аллотермические - нуждающиеся в подводе тепла со стороны для поддержания процесса газификации. Внешний подвод тепла можно осуществлять с помощью твердых, жидких и газообразных теплоносителей [5].

Основные известные технологические схемы газификации твердого топлива: в плотном слое – по методу Lurgi, British Gas/Lurgi; в кипящем слое – по методу Winkler, U-gas, KRW, Westinghouse Corporation; в потоке – по методу Texaco, Shell, Prenflo, Destec, Koppers-Totzek.

Наиболее перспективными среди перечисленных считаются методы газификации в потоке и кипящем слое. [2].

Газификация топлива в стационарном слое является самым ранним способом впервые примененный более сотни лет назад.

Наиболее эффективными зарекомендовали себя реакторы газификации в стационарном слое немецкой фирмы Lurgi. Газификация происходит под давлением около 2,5 МПа. В качестве газифицирующего агента применяется смесь кислорода с водяным паром. Газифицирующий агент подводится через отверстия в решетке и проходит подогреваясь через слой золы. Основное тепло, необходимое для протекания эндотермических (с поглощением тепла) реакций углерода с водяным паром, образуется вследствие горения части углерода в зоне сжигания над слоем золы. Газификация проходит при температуре около 1200°С.

В настоящее время фирмой Lurgi (Германия) разработана конструкция газогенератора внутренним диаметром 4,7 м. Производительность его по газу составляет 100 тыс. м³/ч, а по углю – 50 т/ч, нагрузка поперечного сечения шахты газогенератора – 2,9 т/м².

Наряду с этим следует отметить, что очистка полученного синтез-газа является избыточной по воде, в связи с непрерывным поступлением в коллектор большого количества водяных паров из реактора (непрореагировавший пар, подаваемый для газификации, влага угля, пирогенетическая влага). В связи с этим избыточное количество аммиачной воды непрерывно отводится на утилизацию, необходимым условием которой является очистка.

Преимуществами технологии являются: широкие масштабы процесса внедрения и надежная апробация процесса; основные стадии технологического процесса имеют аналоги в коксохимическом производстве, что позволяет использовать часть основных фондов, инфраструктуры, разработанных конструкций и квалифицированные кадры; газификация происходит под давлени-

ем, что в случае получения синтез-газа означает экономию расходов на компрессию.

Недостатки: использование в качестве сырья дефицитного угля крупностью 6 мм и более; высокие капитальные затраты; высокая энергоемкость; низкая степень использования вторичных энергоресурсов; необходимость выделения и утилизации побочных продуктов (первичной смолы); низкая степень конверсии пара, большое количество сточных вод и высокие затраты на их очистку [3]; невозможность использования в качестве топлива водоугольной суспензии; полное сжигание части угля для поддержания реакции; большое содержание CO_2 в полученном газе; использование в качестве окислителя кислорода.

В 20-х годах прошлого века был разработан процесс Winkler – газификация мелкозернистого угля в псевдооживленном слое.

Дробленный и подсушенный уголь (преимущественно бурый, а также реакционноспособный каменный, буроугольный кокс или полукокс с концентрацией золы до 40 % и высоким содержанием пыли) вводят в псевдооживленный слой реактора. Для поддержания реакции сжигается часть угля. Из-за особенностей процесса удаления золы, температура в реакторе не должна превышать $1300^{\circ}C$. Реакция проходит при атмосферном или слегка повышенном давлении. Степень газификации углерода достигает 90 % [1].

Преимуществами технологии являются: широкие масштабы процесса внедрения и надежная апробация процесса; возможность использования относительно дешевых мелких и высокозольных углей любых марок; отсутствие побочных продуктов (смолы, углеводородов).

Его недостатки: сжигание части угля для поддержания реакции; большое содержание CO_2 в полученном газе; невозможность использования в качестве топлива водоугольной суспензии; значительный унос угольных частичек с генераторным газом.

Разработчик технологии U-Gas – Институт газовых технологий в г. Чикаго (США). При отработке технологии использовали каменный и бурый уголь, а также металлургический кокс. Угольные частицы, максимальный размер которых 6 мм (средний 1 – 1,5 мм), сушатся до влажности менее 5%, после чего подаются в газификатор вместе с сорбентом. Газификация происходит при температуре от $900^{\circ}C$ до $1400^{\circ}C$ и давлении 2,2 МПа. Дутье воздушное [2].

Из недостатков следует отметить: низкокалорийность генерируемого газа вследствие присутствия в нем балластного азота; сжигание части угля для обеспечения реакции; невозможность использования в качестве топлива водоугольной суспензии.

Более перспективной считается технология газификации топлива в потоке. Существуют поточные газификаторы с нисходящим и восходящим потоком. Высокие значения температуры ($1400 - 2000^{\circ}C$) процесса газификации частиц наряду с использованием кислородного и парокислородного дутья (особенно для низкорекреационных видов твердого топлива) обеспечивают самую высокую, по сравнению с другими аппаратами, производительность реакци-

онного объема. Полученные в процессе газификации газы не содержат смол и фенолов.

В способе Koppers-Totzek уголь или другие (твердые или жидкие) углеродсодержащие топлива газифицируют кислородом и водяным паром при атмосферном давлении. Этот способ предъявляет мало требований к физическим и химическим свойствам загружаемого топлива. Нужно, чтобы оно было измельчено до частиц менее 0.1 мм. Для улучшения экономических показателей желательно чтобы содержание золы в топливе было ниже 40%, а остаточная влажность не превышала 8% для бурых углей или 2% для каменных [1]. Для поддержания реакции часть угля полностью сжигается, что обуславливает достаточно большое количество CO_2 в полученном газе. Температура газификации составляет от 1500°C до 1600°C. При таком способе газификации достигается высокая степень превращения углерода и все органические вещества превращаются в термодинамически стабильные соединения, поэтому при охлаждении газа не выделяются конденсируемые вещества (смола, масло, бензол, фенолы) [1].

Преимуществами технологии являются: широкие масштабы процесса внедрения и надежная апробация процесса; возможность использования относительно дешевых мелких и высокозольных углей любых марок; отсутствие побочных продуктов (смолы, углеводородов); высокая степень переработки углерода.

Недостатки технологии: сжигание части угля для поддержания реакции; большое содержание CO_2 в полученном газе; значительный унос угольных частичек с генераторным газом.

Известны методы газификации и ряд фирм их применяющие, такие как Техасо, Destec использующие водоугольные суспензии в качестве продукта газификации.

Процесс разработанный американской компанией Техасо прошел длительную проверку (с середины 1980-х годов) на многочисленных установках малой и средней мощности.

Процесс проводят в потоке на кислородном дутье под высоким давлением, с использованием в качестве топлива ВУС. ВУС образуют каменные угли (60-70%) Pittsburgh N8, Illinois N6 с содержанием серы 2,5-3,5 %.

Основа установки – поточный газификатор работающий при температуре 1320-1430°C, давлении – от 3 до 4 МПа, на кислородном дутье (95% чистоты), производимым специальной кислородной установкой. Подача реагирующей смеси (ВУС и кислород) осуществляется в верхнюю часть реактора. Высокотемпературный среднекалорийный синтез-газ охлаждается в газификаторе в радиационном теплообменнике, где производится пар высокого давления. Охлаждаясь в последнем, сырой синтез-газ из газификатора поступает в два параллельных конвективных теплообменника, где его температура снижается до 430°C, дополнительно вырабатывая пар высокого давления.

Пыль и HCl удаляют в системе мокрой скрубберной очистки. Очищенный синтез-газ подают для сжигания на вход камеры сгорания газотурбинной ус-

тановки. Здесь он смешивается с 98% азотом, поступающим из установки по производству кислорода. Использование азота позволяет снизить температуру в камере сгорания газовой турбины, уменьшая образование NO_x , а также повысить массовый расход через газовую турбину, увеличивая производительность газотурбинной установки. Образующийся жидкий шлак со дна газификатора удаляется в водяную ванну, где затвердевает и может быть использован в строительной промышленности.

В настоящее время процесс Техасо нашел широкое распространение во многих странах. Его преимущества : низкие капиталовложения; возможность использования относительно дешевых мелких и высокозольных углей любых марок; отсутствие стадии приготовления и компримирования пара; отсутствие побочных продуктов (смолы, углеводородов); утилизация значительной части вторичных энергоресурсов; небольшое количество образующихся сточных вод.

Его недостатки: сложность аппаратного оформления; необходимость применения систем автоматического регулирования с малым (доли секунды) временем срабатывания; значительный унос угольных частичек с генераторным газом; относительно невысокая производительность реакторов; низкий термический коэффициент полезного действия[3]; использование в качестве окислителя кислорода.

Процесс газификации угля Destec изначально разрабатывался компанией Dow Chemical для расширения топливной базы посредством перехода от использования природного газа на лигниты и другие угли.

Процесс проводят в потоке на кислородном дутье под высоким давлением, с использованием в качестве топлива ВУС. Особенность процесса – его двухстадийный характер. В качестве топлива использовались местные каменные угли с максимальным содержанием серы 5,9% (на сухую массу), а также нефтяной кокс и его смеси с углем.

Основа установки – двухстадийный поточный газификатор с жидким шлакоудалением, работающий при температуре 1371°C , давлении 2,75 МПа на кислородном дутье (95% чистоты), производимом специальной кислородной установкой. Первая стадия процесса происходит при температуре 1371°C и давлении 2,75 МПа. Достижимый уровень температур зависит от используемого топлива. ВУС (уголь/вода = 60/40 %) подается в нижнюю часть газификатора, смешиваясь с чистым кислородом. Происходит частичное окисление угля, обеспечивая теплом процесс газификации. Образующийся на первой стадии шлак удаляется в водяную ванну и затем используется в строительном производстве. Неочищенный синтез-газ поступает в верхнюю футерованную часть реактора, куда дополнительно вводится ВУС. Здесь же происходит ее реагирование с синтез-газом образовавшимся на первой стадии процесса. На второй стадии теплота сгорания синтез-газа увеличивается, а протекающие эндотермические реакции приводят к его охлаждению до температуры около 1038°C . Использование второй стадии для повышения теплоты сгорания и охлаждения сырого синтез-газа позволяют не устанавливать крупногабаритный

радиационный теплообменник, присутствующий в газификаторе по технологии Техасо. С выхода газификатора синтез-газ поступает в теплообменник, где производит пар для ПТУ, а затем идет в систему горячей очистки на основе керамического фильтра, откуда унос и коксовые частицы вновь возвращаются на первую стадию процесса. Произведенный синтез-газ, состоящий в основном из H_2 , CO , CO_2 , H_2O , N_2 , а также небольшого количества CH_4 , COS , H_2S и NH_3 , поступает в систему сероочистки. Перед удалением H_2S его охлаждают до температуры $38^{\circ}C$. Охлаждение синтез-газа в теплообменниках сопровождается конденсацией воды. Конденсат, содержащий NH_3 и немного CO_2 и H_2S , поступает в систему водоочистки.

Очищенный синтез-газ подогревается в теплообменнике, увлажняется паром для снижения выбросов NO_x и поступает на вход камеры сгорания ГТУ, где сжигается при температуре $1222^{\circ}C$. Отходящие газы поступают в котел-утилизатор для производства пара высокого давления.

Электрическая мощность ПГУ составила 296МВт (брутто), КПД процесса – около 39,7% на угле и 40,2% на нефтяном коксе. Производительность по углю 2544 т/сут. Выбросы NO_x составили менее 64 мг/МДж, SO_2 – менее 43 мг/МДж.

Недостатки данного метода: использование в качестве дутья кислорода высокой степени очистки; большое содержание CO_2 в полученном синтез-газе.

Основные недостатки в описанных технологиях газификации и газификаторах – невысокие скорости конверсии угля, наличие в синтез-газе примесей (SO_2 , NO_x) перегружающих экологию, избыток балластных соединений. Кроме этого сказываются такие недостатки как заметный перерасход газифицируемого сырья для проведения и поддержания реакции газификации, использование дорогостоящих окислителей (O_2), селективность в выборе продуктов газификации.

В разработке технологий газификации нового поколения следует применять качественно новые подходы, переходить от автотермических к аллотермическим процессам используя тепло генерируемое современными источниками – либо ядерными реакциями, либо используя энергию низкотемпературной плазмы. Исследование параметров процессов плазменной газификации углей различной степени метаморфизма, выполненные в ИТФ СО РАН, КазНИИЭ, ИГИ СО РАН показали преимущества плазменной газификации. Они заключаются в высоком качестве получаемого синтез-газа, в полном отсутствии выбросов оксидов азота, серы и других вредных соединений. Предполагается полностью исключить из технологического процесса дорогостоящий кислород, исключить селективность в выборе сырья для газификации, применив в том числе водоугольное топливо.

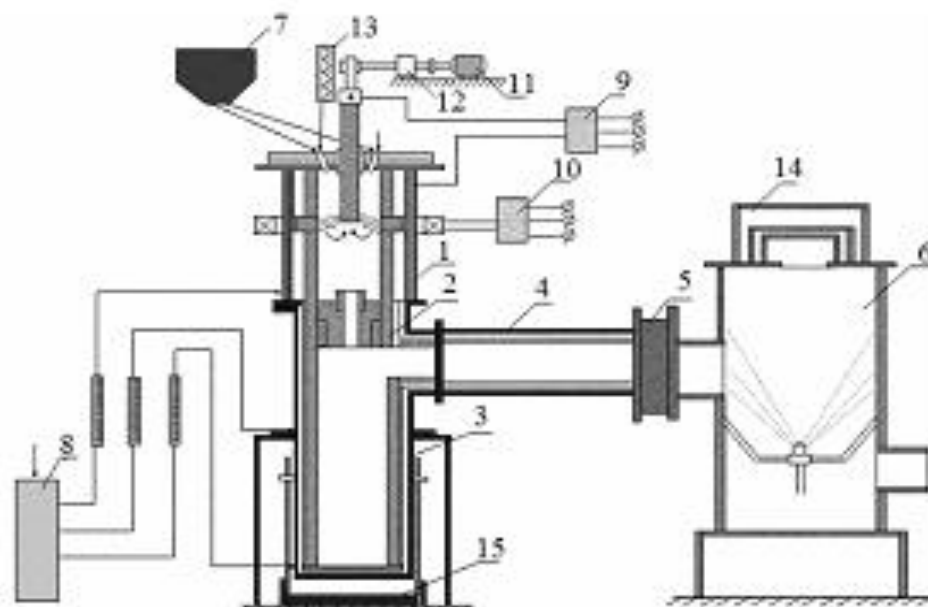
В Московском институте горючих ископаемых, на лабораторной установке с коническим реактором, проводились опыты по плазменной газификации шлама гидрогенизации и ирша-бординского угля.

Плазмотрон, с использованием в качестве плазмообразующего газа водя-

ного пара, состыкован с коническим реактором, через его верхнюю крышку. Шнековым питателем с эжектором, сырье подавалось в плазменный реактор. Сырье подавалось в виде порошка крупностью <200 мкм. Транспортирующим газом в эжекторе служил аргон. Опыты проводили при температуре плазменной струи водяного пара 3000К. Полученный при плазменной газификации газ характеризуется высоким содержанием горючих компонентов ($H_2 + CO$).

Содержание водорода и отношение H_2/CO при плазменной газификации значительно выше, чем при парокислородной, что является преимуществом плазменной газификации [6].

В институте проблем горения Казахстана проведены эксперименты на плазменно-паровом газификаторе номинальной мощностью 100 кВт. Схема генератора приведена на рисунке 1.



1 – плазменный газификатор; 2 – диафрагма, камера разделения синтез-газа и шлака; 3 – шлакобоник; 4 – камера вывода синтез-газа; 5 – диафрагма; 6 – камера гидратации; 7 – топливный бункер; 8 – система охлаждения; 9, 10 – система электроснабжения; 11, 12 – система подачи центрального электрода; 13 – парогенератор; 14 – предохранительный клапан; 15 – подъемник шлакоборника.

Рис.1 – Схема установки для плазменной паровой газификации нефтяного кокса

Электрическая дуга зажигалась между стержневым и кольцевым графитовыми электродами в комбинированном плазменном реакторе 1. Затем мелкодисперсный кокс из пылепитателя 7 через эжекторы, водяным паром подавался в реактор, в область горения электрической дуги. Паро-коксовая смесь взаимодействуя с вращающейся в магнитном поле электрической дугой, образует двухфазный плазменный поток где и происходит процесс газификации кокса. Твердый остаток, образующийся в результате процесса, удалялся через диафрагму 2 в шлакобоник 3. Газообразные продукты удалялись в систему

вентиляции через камеру разделения шлака и газа 2, затем через камеры удаления синтез-газа 4 и гидротации 6.

В обоих экспериментах электрическая мощность плазменного реактора была 60кВт. При этом замеренный КПД плазменного реактора составил около 80 %. Заметим, что высота реактора 0.3 м, а диаметр 0.15 м.

Отношение расхода пара к коксу изменялось в интервале 1.2-1.4. Начальная температура потока пара была 140 °С. Степень газификации углерода кокса (Хс) изменялась от 76.3 до 78.6%. Повышенные, по сравнению с расчетными, значения концентраций N₂ и O₂ можно объяснить наличием неконтролируемого присоса воздуха через уплотнительные прокладки установки, поскольку работает установка под разряжением 10-15 мм водяного столба.

Максимальный выход синтез-газа составил 93.6%, что согласуется с полученной численно концентрацией синтез-газа в 97%. Полученный из петрококса синтез-газ является высококачественным энергетическим газом, который может быть использован вместо металлургического кокса для прямого восстановления железа.

Недостатком данной технологии является не завершенность в плане ее практического применения.

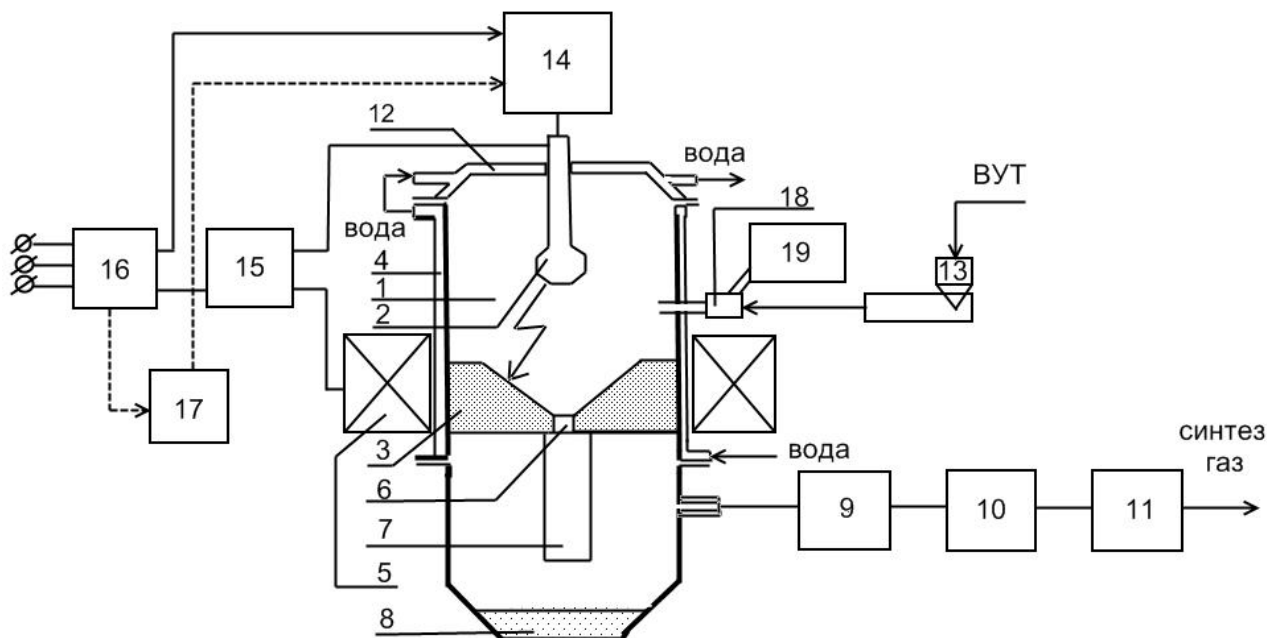
Особенностью способа газификации, который разрабатывается ИГТМ НАН Украины, является применение экологически чистого энергоносителя – водоугольной суспензии. Это особенно актуально при утилизации отходов углеобогащения, высокая влажность которых обуславливает целесообразность изготовления на их основе водоугольного топлива.

Процесс проводится в потоке на паровом дутье с использованием в качестве топлива водоугольной суспензии. 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 намотана катушка соленоида 5 предназначенная для создания постоянного магнитного поля. В аноде днище имеется отверстие-диафрагма 6 ведущее в камеру окисления и золоотвод 8. Верхняя часть реактора закрывается водоохлаждаемой головной частью 12 по оси которой размещен подвижный катод изолированный от головной части и реактора. Подвижность катода регулируется осевым перемещением с помощью специального механизма подъема. Ввод топлива осуществляется шнековым питателем 13 с последующим его эжектированием посредством пара в зону дугового разряда. Синтез-газ, полученный в реакционной камере, через отверстие в аноде-днище поступает в камеру окисления 6, где продолжаются химические реакции, затем через отверстие в камере окисления и золоулавливателем 8 газ поступает в циклон 9, где очищается от механических включений. Охлаждение газа, до температуры окружающей среды, производится в холодильной

камере 10, охлаждаемой проточной водой.

Процесс газификации проходит при температурах 1800-2200К и атмосферном давлении.

Технологическая схема установки представлена на рисунке 2.



- 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

Рис. 2 – Функциональная схема экспериментального образца плазмохимического реактора для газификации водоугольного топлива

Следует отметить следующие преимущества предлагаемого метода по сравнению с другими способами переработки: отсутствие выбросов золы, оксидов серы и азота, других вредных веществ в окружающую среду; повышенную плотность энергии в реакционной зоне; высокую производительность (степень превращения углерода до 96%); легкость автоматизации и оптимизации процесса; возможность реализации комплексной переработки исходного сырья и безотходной технологии; невысокие капитальные вложения и металлоемкость конструкции генератора; возможность использования полученного чистого синтез-газа для дальнейшей переработки в химической промышленности с получением метанола, высших спиртов, ацетилен и т.д.; возможность использования воды содержащейся в рабочей массе угля и ВУС, и полное исключение из технологии потребности в дорогостоящем кислороде; использование пара в качестве окислителя приводит к увеличению калорийности получаемого синтез-газа за счет увеличения в нем содержания во-

дорода.

Данные по составу синтез-газа полученному при разных способах газификации сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Состав синтез-газа полученного при различных способах газификации.

Элемент	H_2 %	CO %	CO_2 %	CH_4 %	N_2 %	Ar %	COS ppm	H_2O %	Теплота сгорания МДж/м ³
Метод									
Lurgi	39,2	17,2	32,4	9,0	1,4	-	-	-	11,1
Winkler	35-46	30-40	13-25	1-2	-	-	-	-	9-12
Koppers-Totzek	30-31	55	10	0,1	-	-	-	-	11,2
Texaco	38,3	42,7	14,4	0,1	3,3	0,9	10	0,3	9,95
Destec	34,4	45,3	15,8	1,9	1,9	0,6	-	-	10,3
ИГИ СО РАН	55,46	41,79	1,52	0,48	0,47	-	-	-	-
ИПГ Казахстан	57,4	36,2	--	-	6,0	-	-	-	-
ИГТМ НАНУ	50-56	35-40	1-1,5	3-5	-	-	-	-	11-13

В условиях большой удаленности крупных месторождений угля от промышленных центров может оказаться целесообразной переработка его плазменным методом в синтез-газ или синтетическое жидкое топливо с последующей транспортировкой жидкого или газообразного топлива в энергопотребляющие районы страны.

Пароплазменная газификация наиболее экономичная и углесберегающая ввиду наибольшего выхода синтез-газа с единицы массы переработанного угля.

Ввиду высокой интенсивности процесса, обуславливающей высокую производительность газогенераторов большой единичной мощности, минимального загрязнения окружающей среды и возможности организации комплексной безотходной технологии, пароплазменная газификация является наиболее перспективной для реализации в самое ближайшее время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Химические вещества из угля : пер. с нем. / под ред. И.В. Калечица. – М.: Химия, 1980. - 616 с.
2. Ю.П. Корчевой, А.Ю. Майстренко, А.И. Топал. Экологически чистые угольные технологии К.: Наукова думка 2004. – 186 с.
3. Тютюнников, Ю.Б. Технологические схемы, расчет и моделирование промышленных процессов газификации угля / Ю.Б. Тютюнников, М. С. Шептовицкий, И.В. Шульга. – Харьков: ХГЭУ, 1996. – 66 с.
4. Георгиев, И. Влияние температуры и состава среды на энергозатраты при плазменной газификации бурых углей различного качества / И. Георгиев, Б.И. Михайлов // Известия Сибирского отделения Академии наук СССР. – 1987 г. – №15
5. Химическая технология твердых горючих ископаемых : учеб. для вузов / Под ред. Г.Н Макарова, Г.Д. Харламповича. - М.: Химия, 1986. - 496 с.
6. Колобова, Е.А. Газификация углей и шлама гидрогенизации в плазме водяного пара / Е.А. Колобова // Химия твердого топлива. – 1983. – № 2 – С. 91-96.
7. Мессерле, В.Е. Плазменно-паровая газификация петрококса / В.Е. Мессерле, А.Б. Устименко, Л. Хан.

Рекомендовано до публікації д.т.н. Л.М. Васильевим 18.08.09.