

ОТЧЕТ

КОНТРАКТ ШБ 02/06/2016-01

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

**Оценка технико-экономического потенциала глубокой
переработки каменного угля УОР «Караканский-Западный»»**

Заказчик: ЗАО «Шахта Беловская»

Исполнитель: Фрайбергская горная академия
институт технологий энергопроизводства и химической
технологии
г. Фрайберг, Германия

Краткое резюме

По заказу ЗАО «Шахта Беловская» специалистами Фрайбергской горной академии выполнены научно-технические работы по выбору наиболее пригодных, с учетом технических и экономических показателей, технологических цепочек для переработки каменного угля УОР «Караканский-Западный» в синтез-газ. Конечной целью, результаты которого представлены в отчете, являлся выбор двух наиболее пригодных схем производства синтез-газа из угля Заказчика. На их основе определены четыре полные технологические цепочки от угля до конечной товарной продукции.

В рамках работ проведен анализ применимости существующих коммерческих технологий газификации, а также инновационной технологии, предложенной Фрайбергской горной академией, для получения синтез-газа из угля Заказчика. Для этого были предварительно определены экспериментальным путем базовые характеристики репрезентативных проб угля Заказчика, необходимые для обсуждения его пригодности для различных технологий газификации (плавкость золы, вязкость расплавленного шлака, реакционная способность угля). Полученные результаты описаны в Разделе 1, они отвечают на постановку задачи, изложенной в Рабочем пакете 1 Контракта между Заказчиком и Исполнителем. Температура начала деформации золы лежит в диапазоне 1.160–1.210 °С, температура плавления в диапазоне 1.310–1.420 °С. Таким образом уголь «Караканский-Западный» применим для технологий газификации в плотном слое и газификации в кипящем слое (точка начала деформации золы лежит выше температуры газогенератора 800–1.000 °С) и для газификации в потоке (при этом температура газогенератора должна быть не ниже 1.520–1.570 °С, для предотвращения застывания шлака). Вязкость расплавленного шлака лежит в оптимальном диапазоне, поэтому уголь «Караканский-Западный» не требует добавки флюсов при использовании для газификации в потоке. Реакционная способность угля недостаточно высока для его использования в коммерческих технологиях газификации в кипящем слое (данные технологии пригодны прежде всего для бурых углей и молодых каменных углей), но хорошо подходит для новой комбинированной технологии, разработанной во Фрайберге.

В Разделе 2.1.2 детально обсуждены вопросы применимости различных коммерческих технологий газификации к получению синтез-газа из угля «Караканский-Западный». С точки зрения выбора типа технологии (газификация в плотном слое, газификация в кипящем слое, газификация в потоке) можно сделать следующее краткое резюме:

Газификация в плотном слое

Данная технология применима только для кускового угля размером от 6 до 60 мм. Угольная фракция 0–6 мм требует дорогостоящего процесса брикетирования угля. Состав полученного синтез-газа непригоден для производства товарного продукта, например метанола, аммиака или синтетического жидкого топлива (ввиду высокого содержания метана), однако применим для генерации электроэнергии или для производства синтетического природного газа. Преимуществом данного типа газификации является низкая потребность в кислороде (ввиду низкой температуры процесса), недостатком – низкая производительность газогенератора, негативно сказывающаяся на экономических показателях (ввиду длительного времени пребывания газовой смеси в реакторе). Находящиеся в эксплуатации реакторы газификации в плотном слое как правило используются для получения синтез-газа из высокосольных, низкокачественных углей или из твердых отходов.

Газификация в кипящем слое

Данная технология использует мелкозернистый уголь размером от 1 до 6 мм. Угольная фракция 0–1 мм принципиально неприменима для газификации в кипящем слое (угольная пыль выносится из реактора). Содержание метана в полученном синтез-газе не такое высокое, как в случае газификации в плотном слое. Тем не менее, газификация в кипящем слое не является оптимальным вариантом для получения синтез-газа, пригодного для переработки в метанол и другие продукты, ввиду пониженного выхода конечного продукта. Газификация в кипящем слое отличается сравнительно невысокой потребностью в кислороде (ниже, чем для

газификации в потоке, но выше чем для газификации в плотном слое). Серьезным недостатком является низкая производительность газогенератора, вызванная прежде всего тем, что газогенераторы с кипящим слоем обычно работают при давлениях близких к атмосферному. На сегодняшний день в эксплуатации находится очень небольшое число газогенераторов с кипящим слоем, в основном в применении к бурым углям, отличающимся сравнительно высокой реакционной способностью. Главные причины ограниченного коммерческого успеха этого типа газификации: невысокая степень конверсии (низкий удельный выход синтез-газа) и недостаточно высокое давление процесса (низкая удельная производительность, отрицательно сказывающаяся на экономике процесса). Дополнительным ограничением в случае угля «Караканский-Западный» является его недостаточно высокая реакционная способность, что привело бы к еще большему понижению степени конверсии.

Газификация в потоке

Большинство коммерческих газогенераторов работает по технологии газификации в потоке, на их долю приходится около 80 % мировых мощностей газификации угля. Данная технология требует измельчение угля до размера меньше 0,25 мм, что приводит к относительно высоким затратам на подготовку угля (дробление угля). Главным преимуществом газификации в потоке является высокая степень конверсии углерода (высокий выход синтез-газа на тонну угля) и очень низкое содержание метана в синтез-газе, что делает его идеально применимым для переработки в метанол и другие продукты. Важным преимуществом для экономики процесса является также возможность реализации газогенераторов с высокой производительностью, благодаря тому, что время пребывания газовой смеси в газогенераторе составляет всего несколько секунд. Наиболее значительным недостатком является высокая температура газогенератора и связанная с этим высокая потребность в кислороде. Ввиду этого газификация в потоке экономически нецелесообразна для переработки высокозольных углей, т.к. требуются повышенные энергозатраты на нагрев золы/шлака до температуры процесса газификации. В случае угля «Караканский-Западный» это не является ограничением для его переработки. Данный уголь положительно отличается низким содержанием золы а также невысокой температурой плавления золы, что позволяет эксплуатировать поточные газогенераторы при сравнительно низкой температуре порядка 1.520–1.570 °С. Кроме того шлак угля «Караканский-Западный» характеризуется, благодаря своему специфическому химическому составу, оптимальным значением вязкости. По этой причине он может использоваться, в отличие от других видов угля, без добавки флюсов для понижения вязкости. Если рассматривать переработку угля Заказчика с получением химводяного или синтетического жидкого топлива, то газификация в потоке является наиболее подходящим типом газификации, среди технологий реализованных в промышленном масштабе. Для более детального выбора одной из технологий в потоке необходимо еще дополнительно рассматривать другие аспекты, например схему подвода угля (сухой подвод через шлюзы, сухой подвод через насосы, подвод водоугольных смесей), конструкцию внутренних стенок (стенки выложенные огнеупорным кирпичем, мембранные стенки), схему охлаждения синтез-газа (с использованием теплообменников, водный квенч, химический квенч). Данные вопросы рассмотрены и обсуждены в Разделе 2.1.2.

В дополнении к коммерческим технологиям газификации, в Разделе 2.1.3 описана инновационная технология COORVED, разработанная и запатентованная во Фрайбергской горной академии. Необходимо учитывать, что данная технология находится в стадии разработки и еще не реализована в промышленном масштабе. Во Фрайберге эксплуатируется опытно-промышленный образец газогенератора работающего по технологии COORVED. Кроме того ведутся подготовительные работы по постройке промышленного образца производительностью 50 тонн/день в химводяной парке Leuna (Германия) в рамках проекта финансируемого министерством экономики ФРГ и рядом угольных и химических компаний Германии. Краткое резюме по этой технологии приведено ниже:

Газогенератор COORVED

Данная технология разработана специально для переработки всей фракции мелкозернистого угля 0–6 мм. Ее принципиальная особенность заключается в том, что она объединяет в себе

преимущества всех трех изложенных выше типов газификации: высокую энергоэффективность благодаря оптимальной утилизации тепла внутри реактора (газификация в плотном слое), относительно невысокую потребность в кислороде (газификация в кипящем слое) и высокое качество полученного синтез-газа (газификация в потоке). Это стало возможным благодаря реализации концепции многослойного газогенератора, включающей в себя газификацию в плотном слое в нижней части газогенератора и в кипящем слое в верхней части.

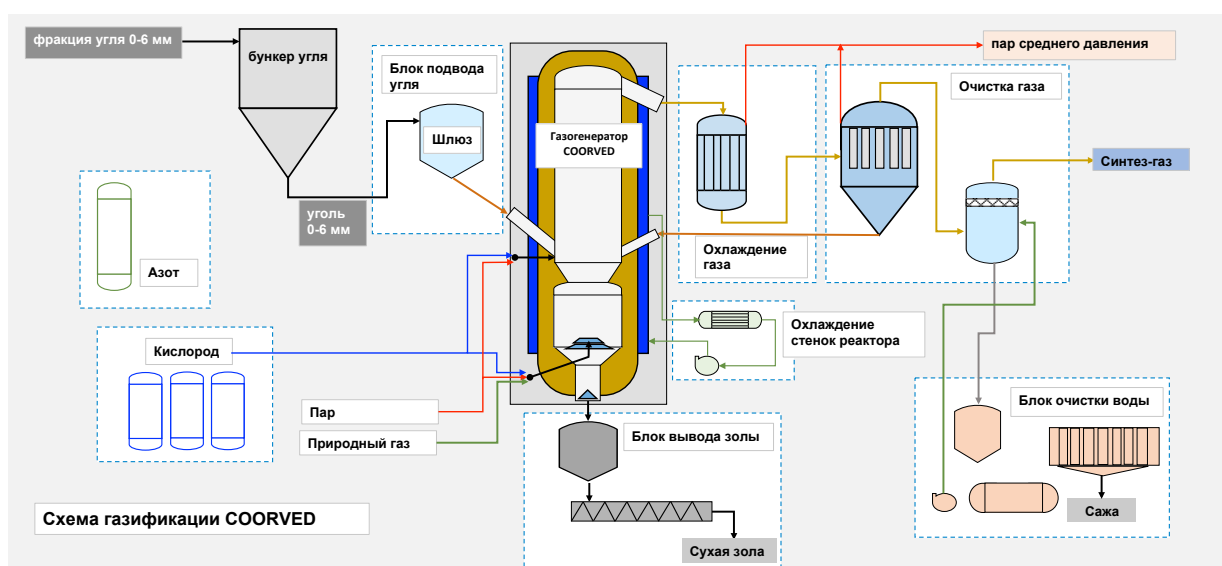
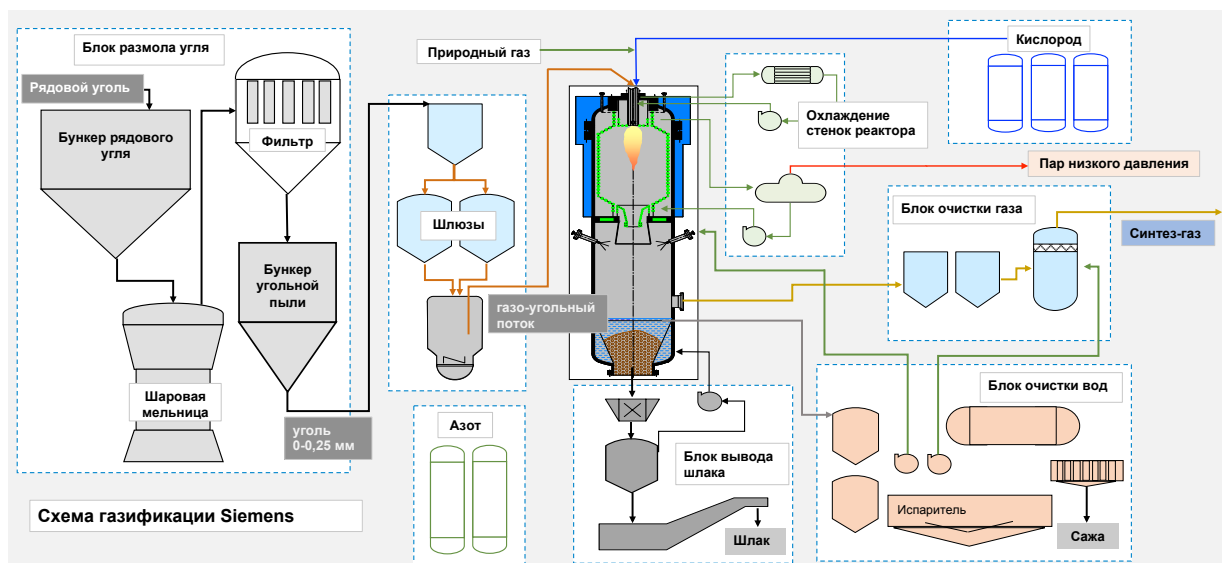
Принимая во внимание базовые характеристики угля «Караканский-Западный», преимущества и недостатки отдельных технологий газификации (матрица сравнения технологий) и предполагаемый спектр конечных продуктов, в Разделе 2.2 были выбраны две схемы газификации наиболее пригодные для угля Заказчика:

1. Технология GSP, представляющая собой вариант газификации в потоке с сухим подводом угля.
2. Инновационная технология COORVED, представляющая собой комбинацию газификации в плотном слое и газификации в кипящем слое. Технология находится в стадии разработки, во Фрайберге эксплуатируется опытно-промышленный образец газогенератора.

Технология GSP коммерциализована компанией Siemens. Китайская компания Shenhua Ningxia Coal Group эксплуатирует в Нингдонг 5 газогенераторов Siemens, каждый производительностью 2.000 тонн/день угля, для переработки угля в полипропилен, и 24 аналогичных газогенераторов Siemens, производительностью по 2.000 тонн/день угля, для переработки угля в синтетическое жидкое топливо. Рядом компаний предлагаются коммерческие технологии, также основанные на процессе GSP и копирующие в определенной степени технологию Siemens. Это технологии Choren Coal Gasification (CCG) немецкой компании Choren, HT-L китайской компании Hangtian и Shenhua Gasifier китайской компании Shenhua Ningxia Coal Group. В Китае на сегодняшний день эксплуатируется более 30 газогенераторов, работающих по этим технологиям, целый ряд новых установок находится на стадии проектирования и строительства.

Полные технологические схемы газификации по технологии GSP (в качестве примера приведена схема газификации Siemens) и по технологии COORVED представлены на Рисунке внизу. По технологии Siemens требуется размол угля в барабанно-шаровых мельницах с получением угольной пыли (95 % меньше 0,25 мм, остальные 5 % в диапазоне 0,25-0,5 мм). Уголь подводится через несколько шлюзов в газогенератор, с использованием газа-носителя и специального оборудования для флюидизации высокоплотного газо-угольного потока. В качестве газа-носителя используется N_2 (что ухудшает качество синтез-газа) или CO_2 (что связано с дополнительными затратами на подачу CO_2). По технологии COORVED необходимость в размолу угля полностью отпадает (используется вся фракция мелкого отсева 0–6 мм). Схема подвода угля в газогенератор значительно более простая (уголь падает в реактор).

Для обеих технологий требуется подача кислорода. Однако ввиду более высоких температур, удельная потребность в кислороде для газогенератора Siemens существенно выше, чем для газогенератора COORVED, что связано с более высокими капитальными затратами и операционными расходами. Ввиду высоких температур, из газогенератора Siemens выводится жидкий шлак, в отличие от газогенератора COORVED с выводом сухой золы. Оборудование для вывода горячего шлака при высоких давлениях является более сложным и соответственно более дорогостоящим, чем для сухой золы. Кроме того, газификация Siemens требует более высоких затрат на очистку воды, выходящей из водного квенча, и в целом более сложную систему автоматизации и контроля за процессом (датчики контроля пламени).



В качестве короткого резюме можно обозначить следующие основные преимущества газогенератора COORVED по сравнению с технологией GSP:

- отпадает необходимость в размоле угля;
- более простая схема подвода угля в газогенератор;
- меньшая удельная потребность в кислороде;
- более простая схема вывода сухой золы;
- меньшие затраты на блок очистки вод;
- более простая система автоматизации.

Для обоих выбранных технологий газификации - поточного газогенератора GSP и многозонного газогенератора COORVED - были разработаны, при помощи коммерческого программного пакета ASPEN Plus, термодинамические модели для адекватного описания процесса. Целью моделирования является расчет материального и энергетического баланса в применении к углю Заказчика. Экспериментальное определение этих характеристик в лабораторных условиях не представляется возможным, так как полученные значения были бы несопоставимы с данными для реальных промышленных установок. Детали изложены в Разделе 2.3.

МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС

Расчеты материального баланса для угля «Караканский-Западный» привели к следующим результатам по удельному выходу синтез-газа ($H_2 + CO$) на килограмм угля (с пересчетом на сухое беззольное состояние):

Газогенератор GSP	1,95 м ³ (н.у.) синтез-газа на 1 кг угля
Газогенератор COORVED	2,04 м ³ (н.у.) синтез-газа на 1 кг угля

Синтез-газ выводится из газогенератора при давлении 40 атм и температуре выше 1.000 °С. Приведенные здесь результаты по выходу синтез-газа пересчитаны на объем газа при нормальных условиях (0 °С, 1 атм) и выражены в м³ (н.у.).

Базовые характеристики процесса и качественные показатели синтез-газа собраны в Таблице.

Уголь Караканский-Западный			
Технология газификации		GSP	COORVED
Параметр	Единицы измерения	Значение	
Потребность O ₂	м ³ (н.у.)/кг угля (сухой, беззольн.)	0,542	0,434
Потребность пара	кг/кг угля (сухой, беззольный)	< 0,01	0,516
Степень конверсии углерода	%	99,8	99,8
Выход синтез-газа	м ³ H ₂ +CO/кг угля (сухой, беззольн.)	1,95	2,04
H ₂ /CO	моль/моль	0,340	0,794
Состав синтез-газа (на выходе из газогенератора)			
H ₂ O	об.-% (сухой газ)	9,5	13,6
H ₂	об.-% (сухой газ)	23,1	38,0
CO	об.-% (сухой газ)	68,1	47,9
CO ₂	об.-% (сухой газ)	7,6	11,6
CH ₄	об.-% (сухой газ)	0,00	1,57
N ₂	об.-% (сухой газ)	1,00	0,83
H ₂ S	об.-% (сухой газ)	0,0200	0,0186

Кроме того, пригодность угля «Караканский-Западный» для производства синтез-газа была сравнена с углями различного качества (высокозольный кузбасский уголь, немецкий антрацит).

Общее резюме:

- уголь Заказчика более пригоден для производства синтез-газа не только по сравнению с менее качественным высокозольным углем, но и с более качественным антрацитом;
- с точки зрения объема и качества синтез-газа, более пригодной технологией для глубокой переработки угля Заказчика является технология многозонной газификации COORVED.

ПРОГНОЗНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЭКОНОМИКИ

На базе полученных данных по материальному и энергетическому балансу для производства синтез-газа из угля «Караканский-Западный» были рассчитаны экономические показатели

(капитальные затраты, операционные расходы, себестоимость синтез-газа). Расчеты привели к следующим результатам по себестоимости производства синтез-газа:

Газогенератор GSP	84,68 евро за 1.000 м ³ (н.у.) синтез-газа
Газогенератор COORVED	62,40 евро за 1.000 м ³ (н.у.) синтез-газа

Распределение себестоимости синтез-газа по статьям затрат представлено в Таблице.

Технология газификации	Себестоимость, евро за 1.000 м ³ (н.у.) синтез-газа	
	GSP	COORVED
Капитальные затраты	36,83	22,00
Операционные расходы	32,66	25,86
Стоимость угля	15,19	14,55
Себестоимость синтез-газа	84,68	62,40

Детали определения прогнозных параметров экономики описаны в Разделе 2.5. Квалифицированная оценка капитальных затрат явилась возможной благодаря тому, что Исполнитель имеет доступ к проектной документации для коммерческих газогенераторов компании Siemens (бывший технический директор подразделения Siemens по газификации угля работает в институте, выполнившим данное научно-техническое исследование).

Прогнозные параметры экономики получения синтез-газа из угля «Караканский-Западный» по технологии COORVED значительно более выгодные, чем для технологии GSP (в данном случае Siemens). Определяющим фактором являются более низкие капитальные затраты для технологии COORVED, которые достигаются благодаря изложенным выше техническим преимуществам этой технологии. В Таблице на следующей странице приведены данные по затратам на отдельные блоки полной технологической схемы газификации для установки производительностью 1.800 т/день рядового угля. Для простоты показаны только прямые затраты на оборудование. Более детально прогнозные параметры экономики представлены в Разделе 2.5.

Технология газификации	Капитальные затраты на оборудование, милл. евро (производительность 1.800 т/день)	
	GSP	COORVED
Блок размола угля	16,2	-
Блок подвода угля в газогенератор	9,2	2,8
Газогенератор	7,7	8,0
Блок вывода золы/шлака из газогенератора	3,9	1,4
Блок получения кислорода	46,3	39,6
Блок первичной очистки газа	4,2	4,0
Блок очистки загрязненной воды	4,8	1,7
Полный комплекс газификации	92,2	57,3

Резюме :

- Проведен обоснованный выбор двух технологий газификации, наиболее пригодных для переработки угля «Караганский-Западный» в синтез-газ;
- Рассчитан материальный баланс и основные прогнозные параметры экономики для получения синтез-газа из рядового угля;
- Выбраны две наиболее пригодные технологии переработки синтез-газа, полученного из угля Заказчика, в конечную товарную продукцию;
- Определены четыре наиболее пригодные полные технологические цепочки от рядового угля до конечного продукта, представляющиеся перспективными как с технической, так и с экономической точки зрения.