

**ПЕРСПЕКТИВЫ ГЛУБОКОЙ  
ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕЙ УКРАИНЫ  
ГАЗИФИКАЦИЕЙ С ПОЛУЧЕНИЕМ  
ПРОДУКТОВ ВЫСОКОЙ ДОБАВЛЕННОЙ  
СТОИМОСТИ**

---

© 2012 Гордиенко А.И., Долгарев Г.В.  
(ПАО «Донецксталь»–МЗ)

*Изложены основные преимущества обновленных низкотемпературных технологий газификации для получения конечных химических продуктов. Рассмотрена возможность низкотемпературной газификации горячих продуктов пиролиза слабоспекающихся углей.*

*The basic advantages of the updated low-temperature gasification technologies to produce the final chemical products are described. The possibility of low-temperature gasification of the hot products of weakly caking coals pyrolysis is studied.*

Ключевые слова: газификация, пиролиз, фиксированный слой, псевдоожиженный слой, метанол, бензин, синтез-газ, вихревой поток.

**П**ерспективы развития тепловой энергетики, удовлетворения спроса на моторные топлива и продукты органического синтеза в различных странах мира связывают с использованием угля, запасы которого достаточно велики.

Высокая степень эффективной конверсии углерода и очистки от вредных примесей угля при его газификации определяют возрастающее внимание к развитию данного направления.

Газификация осуществляется путем химических превращений содержащегося в угле углерода и водяного пара при высоких температурах (свыше 900 °С) с образованием смеси горючих газов (СО, Н<sub>2</sub>, СН<sub>4</sub>). Необходимая для протекания реакций теплота выделяется за счет окисления кислородом части угля. При этом чем выше температура процесса, тем выше его интенсивность и полнота конверсии угля и кислорода в продукты газификации. Содержащиеся в угле сера и хлор переходят в газообразные сероводород и хлористый водород, которые удаляются с помощью промышленных приемов, уже в настоящее время достаточно экономически эффективных. То же касается и очистки продуктов газификации от частиц золы и угля. В итоге при газификации из угля получают смесь чистых горючих газов-восстановителей и тепло, которое может быть использовано.

Таблица 1

Технические характеристики ПГУ

Показатели	Название, энергокомпания, страна расположения			
	Багенум, Nuon Power (Нидерланды)	Вабаш Ривер, Destec, PSI, США	Полк Тампа еl., США	Портолано, Elcogas, Испания
	1	2	3	4
Год начала эксплуатации	1994	1995	1996	1998
Мощность, МВт	брутто	284	314	313
	нетто	253	262	252
КПД по Q <sup>в</sup> <sub>р</sub>	брутто	43,0	39,5	39,0
	нетто			42,2
Тип газификатора	Шелл	Коноко-Филипс (Е-газ)	Дж.Электрик (Тексако)	Пренфло (Uhde)
Тип и изготовитель газо-турбинной установки (ГТУ)	STG5-2000E	7FA	7FA	STG5- 4000F
	Сименс	Дженерал Электрик		Сименс
Уголь на переработку	каменный	каменный/кокс	каменный	уголь/кокс
Производительность по углю, т/час	83	96,5	83	108
Давление в газификаторе, МПа	2,8	2,75	-	2,6
Теплота сгорания газа, МДж/м <sup>3</sup>	11,5	11,5	9,3	10,0

Опытные и промышленные системы газификации угля и очистки получаемых газов проектировались, начиная с 70<sup>х</sup> годов прошлого века, с использованием технологий и оборудования, освоенных в других отраслях промышленности – в первую очередь, химической и нефтеперерабатывающей – соответственно компаниями Shell, Техасо и др. Это и определило приоритет высокотемпературных технологий газификации угля при 1400-1700 °С под давлением в 3-4 МПа в вихревом потоке на кислородном дутье с жидким шлакоудалением. Получаемое в сыром синтетическом газе объемное соотношение  $H_2$  к  $CO$  составляет при этом, как правило, 1:2,4. С учетом приблизительно равной теплотворной способности указанных газов такое соотношение никак не влияет на эффективность производства электроэнергии. Однако для синтеза основного химического продукта – метанола – требуется соотношение, приближающееся к обратному: соответственно 2:1. Необходимое соотношение может быть установлено путем паровой конверсии избытка  $CO$ , но при этом получение дополнительного объема  $H_2$  сопровождается образованием равного объема  $CO_2$ , что нежелательно.

В 90<sup>е</sup> годы в Европе и США построены четыре крупные парогазовые установки (ПГУ) с разными системами газификации, которые эксплуатируются в настоящее время и нарабатывали по несколько десятков тысяч часов на угле. Некоторые технические данные этих установок указаны в табл. 1.

Достигнутые близкие к расчетным значения КПД не являются рекордными и сопоставимы с КПД новых действующих пылеугольных энергоблоков ТЭЦ. Вместе с тем упомянутые производства даже после 10 лет эксплуатации не считались освоенными из-за своей сложности, степень их готовности (степень отлаженности процесса) существенно ниже, чем у традиционных энергоблоков, и составляла 65-75 %. Причинами такого

положения являются, в основном, недостатки вспомогательных систем, особенности работы высокотехнологичных ГТУ на синтез-газе и высокая сложность процессов, требующих дальнейшего изучения.

Следует отметить, что степень готовности производств равной или большей мощности, которые газифицируют тяжелые нефтяные остатки, значительно выше. Вероятной причиной является близость процессов, осуществляемых в плане газификации, к традиционным для нефтяной и химической промышленности, а также относительная простота подготовки топлива, его смешения с газифицируемыми агентами и обработки твердых минеральных продуктов (золы), выход которых, к тому же, значительно меньше, чем при переработке угля.

Другим существенным недостатком производств, основанных на упомянутом способе газификации угля, являются высокие удельные капиталовложения. Для приведенных в табл. 1 ПГУ этот показатель по состоянию на 1995 г. составлял 1500-2000 долларов США на кВт производимой электроэнергии. Компания Tenaska (США) в ноябре 2010 г. в докладе на международной конференции по газификации указала, что при газификации 1,6 млн. т угля по технологиям Siemens для выработки электроэнергии (мощность 602 МВт) объем инвестиций составит 2,4 млрд. долларов США, включая утилизацию 2,4 млн. т двуокиси углерода (в числе способов утилизации предлагаются: перевод в твердые соединения, закачка в нефтеносные пласты для поддержания пластового давления при скважинной нефтедобыче и др.) [1]. Т.е. удельные капиталовложения достигли почти 4000 долларов США на кВт. Разработчики производств по газификации угля активно работают над снижением этого показателя путем совершенствования проектов и стандартизации технических решений и оборудования. Особых успехов пока нет, т.к.

упрощение схем и решений для снижения затрат снижает также и КПД. Тем не менее, выполнен ряд предназначенных для реализации проектов установок по газификации угля – в основном для Китая и США [2].

Разработанные за рубежом проекты установок демонстрируют возможность заметного снижения удельных капиталовложений и улучшения показателей процесса газификации в целом при увеличении производительности и единичной мощности оборудования (срабатывает т. наз. масштабный фактор). Однако и бюджет таких проектов для более емкого оборудования превышает 1 млрд. долларов США.

Опережающий устойчивый рост цен на природный газ и нефть в сравнении с углем после 2002 г. определил экономически и коммерчески оправданное развитие глубокой переработки угля в моторные топлива и химические органические продукты (метанол, карбамид и т.п.), т.е. в товары с высокой добавленной стоимостью [3].

При всех проблемах высокотемпературной газификации угля в потоке неоспоримо одно преимущество данной технологии – возможность переработки как неспекающихся, так и спекающихся углей. Этим она выгодно отличается от другого широко применяющегося в промышленных масштабах процесса – технологии компании Sasol (ЮАР). Последняя заключается в газификации при более низких температурах угля в фиксированном слое, и перерабатывает только неспекающиеся угли.

Процесс Sasol осуществляется в газификаторе шахтного типа. Уголь, поступая сверху, послойно и постепенно перемещается вниз навстречу потоку горячего газа, образующегося в нижней части аппарата, где и протекает парокислородная газификация. При нагреве угля с невысокой скоростью (10 градусов в минуту) в интервале температур 400-800 °С сначала происходит его разложение (пиролиз) с выделением газо-

образных (метан, этан и т.д.) и жидких углеводородов, а также водорода и окиси углерода. При более высокой температуре (1000-1100 °С) оставшийся твердый остаток пиролиза, окисляясь водяным паром, образует в основном в смесь водорода и окиси углерода, а также минеральный остаток (золу) [4].

Жидкие продукты пиролиза (смола, фенолы, нафта) выводятся из процесса дальнейшей конверсии и после сложного выделения из водного раствора и разделения рассматриваются, как товарные продукты.

Следует особо отметить, что технология Sasol не использует даже слабоспекающиеся угли марки “Г” из-за опасности их агрегирования при пиролизе.

Однако, если такие угли после предварительной термической подготовки подвергнуть в отдельном агрегате квалифицированному термическому пиролизу (коксованию), получаемый высокорреакционный твердый остаток (кокс) послужит хорошим сырьем для газификации по подобной технологии. Эффективность процесса повысится приблизительно до 20 %, если кокс, выданный из печи, без тушения весь в горячем виде загрузить в газификатор (подобно загрузке в УСТК)\* [5]. Сырой коксовый газ, содержащий до 55 % водорода, в горячем состоянии также является хорошим сырьем для получения синтетического газа ( $H_2$  – 74 %,  $CO$  – 23 %)\*\* . Такое двухпродуктовое производство (газ + зола) технологически, а не благодаря дополнительным защитным мероприятиям, с экологической точки зрения может быть на порядок безопаснее, чем коксохимическое производство.

В отличие от технологии Sasol, применяющей сортовой уголь крупностью 3-25 мм, что составляет 60-80 % всего рядового

\* Пат. 45184 Украина, 2009, Бюл. № 20.

\*\* Пат. 2423406 РФ., 2011, Бюл. № 19.

угля, предварительное коксование угля требует помола до уровня менее 3 мм, т.е. используются все 100 % угля. К тому же в этом случае возможно частичное

использование в шихте отходов флотации («хвостов») углефабрик, характеризующихся спекаемостью. Данное предложение успешно проверено в промышленных условиях [6].

Таблица 2

Основные характеристики различных технологий газификации

Показатели	Характер взаимодействия топлива с дутьем		
	фиксированный слоевой противоточный	пневматическая подача угольной пыли с вдуванием через горелки в реактор	псевдооживленный слой с рециркуляцией улавливаемых частиц угля
Зольность сырья, %	11,0	8,0	14,0
Крупность частиц сырья, мм	0-50,0	< 0,05	0,15-5,0
Температура газификации, °С	1000	> 1400	1000
Степень конверсии, %	97,0	98,0	96,0
Удельный расход кислорода, кг/т сухого угля	320	640	340
Соотношение H <sub>2</sub> : CO сырого синтез-газа	1,4:1	1:2,4	1,4:1
Удельный выход эффективного синтез-газа, нм <sup>3</sup> /т сухого угля	2070	1900	2050
Выход CO <sub>2</sub> с учетом паровой конверсии, кг/т	500	1280	555
Калорийность газа на выходе из газификатора, ккал/м <sup>3</sup>	2300	2650	2300

Следует заметить, что переработка угля с содержанием более 30 % балласта (в данном случае – золы) становится энергетически невыгодной, и авторитетные компании, занимающиеся газификацией, предельную зольность выше этой величины не показывают. Если же говорить об экономической стороне вопроса, то целесообразно, на наш взгляд, провести обогащение рядового угля до уровня зольности  $\leq 12$  %.

Не менее эффективным способом газификацией угля марок Д и Г при 1000 °С является, по нашему мнению, технология обработки в псевдооживленном слое с рециркуляцией, прототипом которой стала известная технология Winkler. Про-

мышленный газификатор, работающий с 2008 г, мощностью 400 т угля в сутки, показал высокую надежность при непрерывной работе на высокзолном влажном угле, предварительно измельченном до крупности 0,2-5,0 мм. Соотношение H<sub>2</sub> и CO в зависимости от характеристик угля колеблется от 1,05:1 до 1,43:1,0 при степени конверсии углерода до 96 % [7].

Очищенный синтетический газ для синтеза метанола при всех технологиях газификации приводится к необходимому соотношению H<sub>2</sub> и CO благодаря частичной паровой конверсии CO.

Процесс каталитической конверсии метанола в бензин может проходить в реакторе

компании Exxon Mobil по известной промышленной технологии MTG, позволяющей производить до 87 % бензина АИ-92 с качеством евро-V. Наряду с бензином, в процессе конверсии образуется некоторое количество (~10 %) сжиженной пропан-бутановой смеси, которая также является востребованным на рынке товарным продуктом.

Стоит отметить, что полученный в ходе процесса MTG бензин по заключению специалистов США является вполне готовым к реализации продуктом, не требующим дополнительного риформинга и фракционирования. В этом заключается главное преимущество процесса MTG перед известным процессом Фишера-Тропша, в ходе которого образуется смесь синтетических топлив и углеводородов различного типа, требующих последующего разделения и дополнительной переработки в условиях нефтеперерабатывающего завода.

#### Выводы

Рассмотренные варианты предложений по глубокой переработке угля могут быть инвестиционно привлекательны в Украине, т.к. предусматривают:

1. Инжиниринговое построение на основе аналогов применяемых в промышленности передовых технологий, что снижает вероятность получения низкоэффективных результатов;

2. Применение инновационных технологий, использующих слабоспекающиеся угли и отходы углеобогащительных фабрик для создания высоколиквидной товарной продукции с высокой добавленной стоимостью;

3. Отсутствие (как правило) необходимости в технологических решениях особой сложности и в дорогостоящих конструкционных материалах, что делает доступным изготовление газификаторов машиностроителями Украины и снижает стоимость инвестиционных решений;

4. Меньший (в 1,5-2,0 раза) удельный расход кислорода и выход двуокиси углерода в сравнении с газификацией в вихревом потоке;

5. Более низкий объем инвестиций (более, чем в 1,5 раза) в сравнении с решениями ведущих зарубежных фирм (GE, Siemens, Uhde GmbH и др.);

6. Снижение зависимости добычи угля в Донбассе от конъюнктуры угольных рынков, от кризисов в черной металлургии или сезонности потребления угля энергетиками.

7. Повышение энергетической безопасности Украины за счет использования угля в качестве альтернативы нефти и природному газу для производства необходимой для промышленности и населения продукции с высокой добавленной стоимостью (из 1 млн. т угля – до 380 тыс. т бензина А-92 с качеством евро-V и до 50 тыс. т сжиженной пропан-бутановой смеси);

8. Возможность привлечения имеющегося в Украине квалифицированного персонала для формирования трудового коллектива производственного комплекса;

10. Диверсификацию ряда мощностей по производству металлургического кокса для получения химических продуктов и моторного топлива из слабоспекающихся угля, широко представленных в Украине.

Ключевые решения для осуществления процесса газификации твердого продукта пиролиза являются объектами интеллектуальной собственности ПрАО «Донецксталь»–МЗ».

#### Библиографический список

1. *Welniak J. The cost estimating process / Jim Welniak, Tenaska, Dan Lumma, Kiewit // Gasification Technologies Conference: mater. inter. conf., November 2, 2010. – San Francisco, U.S.*

2. *Xia L. China gasification market outlook / Lei Xia // Gasification Technologies Conference:*

*mater. inter. conf., October 10, 2011. – San Francisco, U.S.*

3. **Краснянский Г.Л.** Уголь в экономике России / **Г.Л.Краснянский, В.Е.Зайденварг, А.Б.Ковальчук, А.И.Скрыль.** – М.: Экономика, 2010. – 383 с.

4. **Van Dyk J.C.** *Sasol's Unique Position in Syngas Production from South African Coal Sources Using Sasol-Lurgi Fixed Bed Dry Bottom Gasifiers* / **J.C.Van Dyk, M.J.Keyser, M.Coertzen** // *Proceedings of the Gasification Technologies: mater. inter. conf., October 3-6, 2004. – Washington, DC.*

5. **Зубилин И.Г.** Получение из углей энерго-восстановителей для базовых отраслей промышленности / **И.Г.Зубилин, В.И.Рудыка,**

**С.И.Пинчук.** – Харьков: ИЦ ХНУ им. В.Н.Каразина, 2004. – С 175-178.

6. **Гордиенко А.И.** Результаты освоения и эксплуатации опытно-промышленной установки термической подготовки шихты на ОАО «Ясиновский коксохимический завод» **А.И.Гордиенко, Г. В. Долгарев [и др.]** // *Кокс и химия.* – 2009. – № 2. – С. 30-36.

7. **Preston W.** *Synthesis energy systems. Making a global impact* / **W.Preston** // *Gasification Technologies Conference: mater. inter. conf., October 10, 2011. – San Francisco, U.S.*

Рукопись поступила в редакцию 18.10.2011