

Глубокая переработка угля: критический анализ технологий

Deep coal processing: a critical analysis of technologies

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-6-32-39>

ИСЛАМОВ С.Р.

Доктор техн. наук,
технический директор
ООО «Уголь-инжиниринг» АО «СУЭК»,
660058, г. Красноярск, Россия,
e-mail: IslamovSR@suek.ru

Представлена краткая историческая справка развития глубокой переработки угля в России. Критический анализ ключевых технологий этого класса показывает, что они не имеют перспективы развития в нашей стране по причине низкой степени готовности, а также низкой конкурентоспособности с технологиями на базе природного газа и нефти. Стратегическая задача угольной промышленности заключается в повышении доходности экспорта в условиях ограниченной пропускной способности транспортных путей. Единственным экономически обоснованным решением является увеличение стоимости экспортной продукции, которое может быть достигнуто путем термического обогащения углей энергетических марок с целью вывода на премиальный ценовой уровень.

Ключевые слова: термическое обогащение угля, бурый уголь, полукокс, частичная газификация угля, теплота сгорания, экологическая безопасность.

Для цитирования: Исламов С.Р. Глубокая переработка угля: критический анализ технологий // Уголь. 2024;(6):32-39. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-6-32-39.

Abstract

A brief historical background on the development of deep coal processing in Russia is presented. A critical analysis of the key technologies of this class shows that they have no prospects for development in our country due to the low degree of readiness, as well as low competitiveness with technologies based on natural gas and oil. The strategic task of the coal industry is to increase export profitability in conditions of limited capacity of transport routes. The only economically feasible solution is to increase the cost of export products, which can be achieved by thermal enrichment of thermal coals in order to bring them to a premium price level.

Keywords

Thermal enrichment of coal, brown coal, semi-coke, partial gasification of coal, calorific value, environmental safety.

For citation

Islamov S.R. Deep coal processing: a critical analysis of technologies. *Ugol*. 2024;(6):32-39. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-6-32-39.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в статистических отчетах угольной промышленности под переработкой угля подразумевается его обогащение, преимущественно методами гравитационной сепарации. Для отличия от этого уровня технологий с некоторых пор стали использовать термин «глубокая переработка угля», который включает в себя многообразные способы термического и химического воздействия на уголь. Безусловным лидером в этой области является коксовое производство, которое на протяжении более чем вековой истории развивалось по собственной траектории, обусловленной тесной связкой с доменным производством чугуна. Кстати, здесь следует отметить тенденцию к сокращению объема доменного производства в связи с переходом к прямому восстановлению железной руды (DRI). Лидером этого направления является Европа, которая активно тестирует безуглеродные технологии DRI. Так, в марте 2024 г. в Великобритании закрыли последний завод по производству кокса. Очевидно, что развитие этого тренда неизбежно приведет к снижению мирового потребления коксующихся углей, которое в определенной мере будет сдерживаться только индийской металлургией.

В данной работе рассматриваются технологии глубокой переработки угля, которые находятся за рамками коксохимии.

В нашей стране глубокая переработка угля достигла своего пика на рубеже 1950-1960 годов. Так, например, в СССР в 1958 г. объем производства генераторного газа составлял около 35 млрд м³/г. Вплоть до конца 1960-х годов аммиак производился преимущественно путем переработки угля. Можно приводить много показателей, характеризующих уровень достижений тех лет. Однако с приходом в промышленность природного газа это направление использования угля быстро сошло на нет.

После мирового энергетического кризиса 1973 г. в США открыли целый ряд программ по глубокой переработке угля с многомиллиардными бюджетами, в первую очередь, с целью получения жидкого топлива как альтернативы арабской нефти. Несмотря на полную обеспеченность нефтью и природным газом, в 1980 г. Правительство СССР также сформировало госпрограмму по переработке угля. К сожалению, средства расплылись между многочисленными исполнителями, и в итоге никаких значимых результатов, которые могли бы способствовать развитию этой отрасли, получено не было. Годом ранее было принято постановление правительства «О создании Канско-Ачинского топливно-энергетического комплекса», в котором значительное место отводилось глубокой переработке бурого угля. Однако к началу перестройки удалось выполнить не более 5-7% от запланированного объема работ. Главным результатом этой программы можно считать создание Березовского угольного разреза и первой очереди Березовской ГРЭС на юге Красноярского края.

В области переработки угля самым крупным достижением того периода времени можно считать сооружение установки ЭТХ-175 (площадка ТЭЦ-2, г. Красноярск), предназначенной для скоростного пиролиза 1 млн т/год

бурого угля с получением смолы, полукокса и пиролизного газа. На первом этапе целевым продуктом считался горючий газ. Затем акцент был перенесен на смолу. Авторы проекта ошибочно или намеренно позиционировали ее как котельное топливо [1]. Однако в конечном итоге не удалось найти сторонних потребителей смолы и ее сжигали на месте производства, что сопровождалось крайне отрицательными экологическими и санитарными последствиями.

Мелкозернистый полукокс (<0,5 мм) в то время также оказался невостребованным, несмотря на то, что в 1971 г. был выполнен успешный эксперимент по вдуванию полукокса в горн доменной печи [2]. Можно сказать, что этот продукт на много десятилетий опередил будущую потребность металлургии в высококачественном и дешевом пылеугольном топливе (ПУТ). В течение 12 лет Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского так и не смог добиться надежной и устойчивой эксплуатации крайне сложного оборудования, и в 1987 г. проект был закрыт. Спустя 20 лет сотрудники этого же института выполнили критический анализ технологии скоростного пиролиза с промежуточным теплоносителем [3]. Один из выводов может быть применен к большому количеству других разработок в области глубокой переработки угля: главной причиной неудачи проекта стала невозможность реализации в аппаратах промышленного масштаба положительного эффекта, достигнутого на уровне лабораторной установки.

Очередная волна интереса к глубокой переработке угля стала формироваться с приходом нового поколения разработчиков, начиная примерно с 2010-х годов. Характерная особенность этого периода заключается в вольном или невольном игнорировании достижений прошлых лет. Как следствие, очень многие из «новых» технологий оказываются дубликатом известных ранее разработок полувекковой и более глубокой давности. Дело в том, что подавляющая часть известных сегодня технологий термической переработки угля была разработана немецкими инженерами до начала II Мировой войны. Они описаны в немецком справочнике довоенного издания, переведенном на русский язык в 1948 г. [4]. Также в Германии до начала этой войны было воспроизведено в промышленном масштабе прямое и косвенное ожижение угля. Итоги того периода обобщены в двухтомной монографии по производству синтетического жидкого топлива из угля [5, 6]. И практически для каждой новой технологии можно найти прототипы в разработках прошлых лет.

Очень часто приходится сталкиваться с отсутствием у разработчиков четкого понимания сроков и масштаба инвестиций, необходимых для вывода технологии на коммерческий уровень. Как правило, основное внимание концентрируется на принципиальной возможности превращения угля в определенные продукты. Крайне редко приводятся обоснование экономической целесообразности их производства, а также оценка потенциального рынка сбыта. Без учета указанных факторов ценность новых разработок резко снижается.

И еще один исключительно важный момент. В обозримой перспективе глубокую переработку угля необходи-

мо сориентировать на увеличение добавленной стоимости экспортной продукции в рамках традиционной номенклатуры. Это особенно актуально в условиях, когда темпы развития экспорта опережают рост пропускной способности железнодорожных путей и портов восточного направления. К сожалению, активность разработчиков в этом направлении крайне низкая.

ОЦЕНКА СТАТУСА НАИБОЛЕЕ ПОПУЛЯРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

1. Производство сорбентов

На уровне общения с потенциальными инвесторами, в публикациях СМИ, на конференциях разного уровня приходится сталкиваться с декларациями типа «мы планируем производить сорбенты из угля». При этом, как правило, заявители не имеют представления о том, что сорбенты – огромный класс продуктов, различающихся по многим параметрам качества, которые обеспечиваются путем использования разного сырья и разных технологий производства. Вторая проблема – очень ограниченный рынок сбыта, представленный узкоспециализированными потребителями и жестко конкурирующими производителями. В настоящее время, по грубой оценке, суммарная емкость рынка по всем маркам углеродных сорбентов вряд ли достигает 50-60 тыс. т в год. Входной порог для новых производителей очень высокий! Требуется высокий уровень квалификации как в сфере использования сорбентов, так и в технологии их производства. Безоговорочное условие – наличие значительного преимущества в себестоимости продукции по сравнению с действующими игроками для конкурентного вхождения в рынок.

Сегодня на разных стадиях готовности находятся два относительно крупных проекта. Новокузнецкое ООО «Активные угли» (АО «Топпром») планирует в 2027 г. построить завод для производства 10 тыс. т в год высокоактивного сорбента. АО «СУЭК» в 2025 г. запустит вторую очередь производства специализированного сорбента для гидрокрекинга гудрона мощностью 15 тыс. т в год. При этом необходимо отметить, что ряд действующих предприятий работает ниже своей проектной мощности в связи с ограниченным сбытом продукции.

2. Производство удобрений/стимуляторов роста растений

Очень много говорится о возможности производства гуматов и прочих стимуляторов роста растений. Этот сегмент рынка уже давно функционирует, но в микроскопическом объеме. Основными потребителями являются владельцы огородов и дачных участков. В промышленном растениеводстве этот класс удобрений не используется по очень простой причине. У сельхозпроизводителей есть надежные, апробированные в многолетней практике протоколы использования удобрений. Вряд ли кто-то из них пойдет на риск и по своей инициативе изменит устоявшиеся правила. Поэтому задача производства удобрений из угля – не технологическая. Она сводится к более глубокому изучению влияния «гуматов» на разные культуры и к разработке ме-

тодик их использования в хозяйствах промышленного масштаба. То есть это задача для сельскохозяйственных НИИ. Бизнес может подключиться к этому процессу после того, когда будет сформирована масштабная потребность в этом классе удобрений.

3. Извлечение ценных элементов из минеральной части углей

Прежде всего необходимо отдавать себе отчет в том, что за исключением крайне редких случаев содержание ценных элементов в углях носит спорадический характер. В 1980-х годах была выполнена огромная работа по анализу геологических данных крупнейших месторождений Канско-Ачинского бассейна. В керне из одной скважины обнаруживалось практически промышленное содержание, например, золота, иридия или урана, а в соседних скважинах – только следы этих элементов. По итогам работы на уникально огромном месторождении (порядка 100 млрд т) не было выявлено ни одного участка, пригодного для промышленной добычи ценных элементов.

Второй не менее важный момент. На тех участках угольных месторождений, где все-таки установлено повышенное содержание некоторого элемента, как правило, его средняя концентрация соответствует геологическому термину «бедная руда». К сожалению, на сегодняшний день нет экономически целесообразных методов переработки бедных руд. Поэтому большинство попыток промышленного извлечения ценных элементов из минеральной части угля оказалось безуспешным.

ВЫВОД 1. С позиции государственной программы развития переработки угля, рассмотренные выше технологии 1, 2, 3 не представляют интереса ввиду их ничтожного масштаба.

4. Производство синтетического жидкого топлива

Из года в год перспективе производства синтетического жидкого топлива (СЖТ) из угля дается отрицательная оценка в разных обзорах [7, 8]. Ранее подробный экономический анализ причин неконкурентоспособности этой технологии был выполнен в нашей статье [9]. Однако никакие предостережения не останавливают регулярно появляющихся энтузиастов, которые, как правило, не утруждают себя изучением предыстории этой технологии, ее экономическим анализом, а во главу угла ставят экспериментальный факт: мы из угля получили бензин! В этой связи уместно напомнить, что в 1990-х годах в Израиле в качестве альтернативы арабской нефти разработали технологию получения бензина из городских фекальных вод. Безусловно, это выдающееся технологическое достижение, но не имеющее никакой экономической перспективы.

Чаще всего в качестве примера для подражания сторонники СЖТ из угля приводят заводы, построенные в ЮАР и Китае, забывая о кардинальном отличии российской топливно-энергетического баланса, в котором огромное место занимают нефть и природный газ.

Корпорация SASOL (ЮАР) уже давно перевела с угля на природный газ первый завод по производству жидкого топлива в г. Сасолбург. SASOL добывает и перерабатывает около 30 млн т угля в год. Поэтому на аналогичное решение по поводу более мощного завода в г. Секунда Правительство ЮАР наложило вето из-за опасения социального взрыва, который неизбежно спровоцирует радикальное свертывание угольной отрасли. Интересно отметить, что SASOL является крупнейшим в мире индустриальным эмитентом углекислого газа. При ожигании угля производится около 180 кг CO₂ на 1 ГДж энергии, заключенной в жидком топливе, и 80-85 кг выделяется при сжигании этого же количества топлива, т.е. суммарно – около 260 кг CO₂/ГДж. Для сравнения: при сжигании природного газа выделяется 60 кг CO₂/ГДж энергии.

Китай на определенном этапе развития своей экономики сделал ставки на разные варианты достижения независимости от импортной нефти и нефтепродуктов, в том числе на СЖТ из угля. На основе адаптированных импортных технологий ожигания угля китайцы построили несколько очень крупных заводов. Их суммарная мощность по СЖТ – около 8 млн т в год. Кстати, здесь необходимо отметить, что удовлетворительная рентабельность производства достигается только на уровне крупных заводов мощностью не менее 3-4 млн т угля в год, в то время как российские изобретатели чаще всего предлагают строить мини-заводы, не утруждая себя экономическими расчетами. На сегодняшний день нет какой-либо информации о намерениях существенно увеличить производство СЖТ из угля в Китае.

Очень часто сторонники развития технологии ожигания угля ссылаются на отечественные достижения в этой области в конце прошлого века. К большому сожалению, результаты тех лет не вышли за рамки исследования механизмов гидрогенизации угля и не обеспечили предпосылок для коммерческого производства жидкого топлива. Высшим достижением многолетних трудов Института горючих ископаемых (Минуглепром СССР) стало строительство пилотной установки СТ-5 (200 кг угля в час), в рамках которой так и не удалось осуществить непрерывный процесс получения бензина из угля.

Однако дело совсем не в этой установке. Ключевая проблема технологии заключалась в ставке на молибденовый катализатор взамен железной руды в оригинальной немецкой технологии гидрогенизации угля. Впервые такой катализатор разработали в фирме BASF еще в 1925 г. В российском исполнении дорогой катализатор активно взаимодействовал с высококальциевой золой угля без какой-либо перспективы экономически целесообразной регенерации. Не было найдено технических решений для сепарации жидкого продукта от твердых частиц. И, наконец, открытым до сегодняшнего дня остается вопрос производства дешевого водорода – главного реагента технологии гидрогенизации, стоимость которого радикальным образом влияет на экономику технологии в целом. Этих причин более чем достаточно для того, чтобы отклонить появляющиеся время от времени призывы к «возрождению» технологии ИГИ.

Интересно, что ряд зарубежных экспертов ставят под сомнение целесообразность производства даже нефтяного моторного топлива, если в распоряжении появится дешевый водород, который можно использовать в электромобилях с топливными элементами.

Безусловно, определяющим фактором являются экономические условия для производства СЖТ из угля. В ценовой структуре нефтяного бензина более 60% занимают налоги и акцизы, которые в неизменном виде сохраняются при производстве «угольного» бензина [8]. Единственным аргументом адептов «угольного» СЖТ является более низкая цена угля по сравнению с нефтью (в пересчете на единицу энергии). Однако, по оценке специалистов интернет-ресурса «Геоэнергетика инфо», даже при нулевой стоимости нефти цена бензина на АЗС будет не ниже 37-40 руб./л. Если принять во внимание существенно более высокие капитальные затраты на передел «уголь – бензин», то вряд ли удастся обеспечить хоть какую-то конкурентоспособность такого производства.

И, наконец, обратимся к структуре топливного баланса страны. На обозримую перспективу производство моторных топлив с избытком обеспечено нефтяным сырьем. Более того, объем производства может быть радикально увеличен за счет глубокой переработки огромного количества мазута и гудрона. Это радикально дешевле и быстрее по сравнению с затратами и сроками создания практически с нуля новой отрасли для ожигания угля.

В качестве яркого примера можно привести проект компании «ТАИФ» по переработке гудрона в светлые моторные топлива. Строительство завода в г. Нижнекамске мощностью 2,7 млн т гудрона в год по лицензии американской компании KBR (Kellogg и Brown & Root) было начато в 2012 г. В основе – немецкая технология ожигания угля 1940-х годов, существенным образом усовершенствованная специалистами KBR совместно с British Petroleum. Стартовая стоимость проекта в ценах 2012 г. – более 2 млрд дол. США.

В проектировании завода, изготовлении уникального оборудования, строительстве и пуско-наладочных работах участвовали более десятка крупнейших зарубежных компаний. Завод был сдан в эксплуатацию только в 2021 г., поскольку импортную технологию пришлось дорабатывать силами специалистов ТАИФа, причем со значительными дополнительными затратами, не предусмотренными в первоначальном проекте. Несмотря на колоссальную концентрацию финансовых и технологических ресурсов, на сегодняшний день предприятие еще только приближается к целевому уровню 98%-ой конверсии нефти в светлые продукты. Здесь уместно задать вопрос: можно ли найти в нашей стране инвестора такого класса, как ТАИФ, для проекта по ожиганию угля? Насколько мне известно, ведущие угольные компании не имеют подобных намерений. А нефтяные компании, по понятной причине, ориентированы только на собственное сырье.

При крайней необходимости наиболее эффективным заменителем нефти может стать природный газ. Степень промышленной готовности газохимической тех-

нологии получения моторных топлив на порядок выше, чем угольной. При этом, как это ни парадоксально, Газпром, обладающий колоссальными инвестиционными ресурсами и предельно дешевой сырьевой базой, практически не обращает внимания на тему СЖТ из природного газа.

Что касается сырьевой базы для СЖТ из угля, то единственным кандидатом является бурый уголь Канско-Ачинского бассейна, добычу которого осуществляет АО «СУЭК». В свое время специалисты этой компании на основе результатов выездной сессии в ЮАР выполнили оценку экономики проекта производства СЖТ в форме совместного предприятия с корпорацией SASOL. Итоговый вывод оказался убедительно отрицательным. Поэтому СУЭК не принимает к рассмотрению каких-либо новых предложений на эту тему.

5. Газификация угля

Прежде всего необходимо принять к сведению, что газификация угля – технология незавершенного цикла, потому что она не предназначена для производства рыночного продукта. Газификация – это способ подготовки угольного топлива для использования в базовых промышленных технологиях, которые можно разделить на два класса: химический синтез и энергетика. Кратко рассмотрим оба направления.

5.1. Производство синтез-газа для химической промышленности

В химической промышленности России в подавляющем большинстве случаев синтез-газ производится из природного газа, гораздо реже – из попутных газов нефтепереработки. Основные определяющие факторы: сравнительно низкая цена сырья, наличие надежного оборудования большой единичной мощности, а также соответствующих катализаторов. В первую очередь это относится к производству метанола и аммиака. Спорадические инициативы по использованию угля для этих целей затухают на стадии экономической оценки.

Необходимо жестко констатировать, что в настоящее время в нашей стране нет оригинальных, глубоко проработанных технологий газификации угля, а также соответствующего оборудования промышленного уровня. Возможность импорта такого оборудования крайне ограничена, а радикально возросшая стоимость категорически исключает возможность его потенциального использования в проектах по переработке угля. Результаты лабораторных исследований в университетах, а также отдельные попытки копирования конструкций известных зарубежных газификаторов вряд ли подлежат рассмотрению, поскольку авторы традиционно не принимают в расчет сроки и затраты, необходимые для выхода на уровень коммерческого производства.

Преимущество угля как сырья, при ценовом соотношении с природным газом, в значительной мере кажущееся, поскольку сравнение необходимо делать не по стоимости исходного сырья, а по себестоимости производства синтез-газа того или иного назначения.

5.2. Газификация угля в энергетике

Так называемая технология внутрициклового газификации угля в энергетике представляет интерес только под углом использования парогазового (бинарного) цикла, который позволяет значительно повысить КПД производства электроэнергии. На первом этапе горючий газ сжигается в газотурбинном блоке, затем за счет энергии отходящих газов в энергетическом котле производится пар для паровой турбины. Важное условие: газификатор должен работать под высоким давлением, потому что компримирование генераторного газа – исключительно дорогостоящая операция, кроме того, не обеспеченная отечественным оборудованием большой мощности.

Необходимо отметить, что за рубежом внутрициклового газификация угля не получила широкого распространения. Что касается России, то ведущие энергетические компании никогда не демонстрировали интереса к этой технологии.

Газификация угля при низком давлении для последующего сжигания газа в котле не имеет экономического смысла, поскольку реализует двухступенчатую схему сжигания с повышенными капитальными и операционными затратами, как правило, без получения какой-либо коммерческой выгоды.

В любых энергетических схемах природный газ имеет явное преимущество по сравнению с вариантом предварительной газификации угля как по цене, так и по степени готовности промышленного оборудования.

По совокупности приведенных причин в стратегических планах энергетических компаний России отсутствуют намерения строить парогазовые блоки на угольном топливе или использовать предварительную газификацию угля перед сжиганием.

ВЫВОД 2. Основные углехимические технологии 4-5 не имеют перспективы крупномасштабного развития в силу недостаточной конкурентоспособности с традиционными технологиями на базе нефти и природного газа, которые в течение длительного периода использования достигли высокого уровня экономичности и надежности.

6. Производство водорода из угля

В формулировке задачи присутствует элемент оксюморона: намерение производить водород из углеродного сырья, в котором этот элемент практически отсутствует! В результате 100% углерода будет превращено в углекислый газ с вытекающими проблемами его утилизации. Данный факт вступает в резкое противоречие с постулатами «зеленой» экономики, которая рассматривает водород как одно из средств перехода к безуглеродному будущему. Но в данном случае подразумевается производство H_2 на базе возобновляемых источников энергии, в худшем случае – путем конверсии природного газа. Согласно цветовой классификации водороду из угля присвоен черный цвет, который, по сути, является черной меткой для его потребителей.

Единственный промышленно освоенный способ получения водорода из угля – газификация с последующей конверсией оксида углерода и сепарацией целевого продукта [10]. Таким образом, степень готовности технологии производства водорода из угля находится в полной зависимости от состояния технологии газификации угля в нашей стране, о котором сказано выше.

На сегодняшний день нефте- и газохимические заводы полностью удовлетворяют свои потребности в водороде за счет его производства из собственного сырья непосредственно на месте использования. На обозримую перспективу вряд ли можно прогнозировать формирование крупномасштабной структуры потребления водорода в России.

ТЕРМИЧЕСКОЕ ОБОГАЩЕНИЕ КАК ЭКОНОМИЧЕСКИ ЦЕЛЕСОБРАЗНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ГЛУБОКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЯ

Перспективы развития угольной промышленности в значительной мере связаны с экспортом. В связи с перестройкой его структуры лимитирующим фактором оказалась пропускная способность железных дорог в восточном направлении. Ожидаемое расширение узких мест на РЖД только приподнимет потолок ограничений, но не устранил его. Доставка каких-то объемов угольной продукции по Севморпути не приведет к качественному изменению ситуации.

В экспортной корзине (без учета коксующихся углей) преобладающую долю занимают энергетические угли пониженной ценовой категории (марка Д и ее производные). Очевидно, что единственным решением для повышения доходности экспорта в условиях фиксированной пропускной способности, а также тарифного прессинга со стороны транспортных компаний является увеличение доли продукции премиального качества. Она востребована в двух самых крупных сегментах угольного рынка.

Энергетика. Угольная энергетика в течение последних десятилетий активно трансформируется в направлении повышения параметров водяного пара (сверхкритические и супер-сверхкритические параметры), а также снижения удельных выбросов углекислого газа. Сформировавшаяся концепция получила наименование HELE = high efficiency + low emissions. Достижение ее целей возможно только при использовании твердого топлива премиального качества: минимальное содержание золы, влаги и серы, низшая теплота сгорания – существенно выше 6500 ккал/кг. Такие требования могут обеспечить только отдельные производители углей марок СС и Т. Антрациты тоже используются на этих ЭС, однако они менее предпочтительны из-за высоких энергозатрат на помол и очень низкой реакционной способности.

Металлургия. Эта отрасль промышленности потребляет порядка 1 млрд т в год преимущественно высококачественного угля. На второй позиции после коксующихся углей находится топливо марки PCI (pulverized coal injection). Так, например, для Китая это немногим

меньше 100 млн т в год. Требования к качеству угля в данном приложении аналогичны требованиям в энергетике HELE. К металлургическому топливу прямого назначения, которое выполняет роль углеродного восстановителя в металлургических процессах (в первую очередь, в электрометаллургии), предъявляются повышенные требования по содержанию углерода и реакционной способности.

Технология частичной газификации угля «Термококк-КС»

В России потенциальные запасы низкозольных углей марок СС и Т существенно меньше, чем обычных энергетических углей. Очевидным способом увеличения производства углей класса HELE и PCI является глубокая переработка более доступных и более дешевых углей низкой степени метаморфизма. Гравитационное обогащение энергетических углей не в состоянии решить такую задачу. В этом случае требуется привлечение технологий термического обогащения, которые способны переработать угли с высоким содержанием летучих веществ и влаги в аналоги углей марок СС и Т. Однако сырьевая база для этого класса технологий ограничена только низкозольными углями Канско-Ачинского бассейна, имеющими минимальную себестоимость вследствие крупномасштабной добычи открытым способом.

Наиболее эффективной технологией термического обогащения является технология частичной газификации угля в кипящем слое – «Термококк-КС» [11]. Процесс переработки осуществляется в типовом энергетическом котле со встроенным реактором кипящего слоя угля на воздушном дутье. В результате взаимодействия при высокой температуре уголь и подаваемый с дефицитом воздух превращаются в газовое топливо и бурый угольный кокс (полукокк), который является целевым продуктом.

Экологические показатели. Генераторный газ с незначительной добавкой уноса полукокса из кипящего слоя сжигается непосредственно в котле, обеспечивая экологические характеристики, близкие к соответствующим характеристикам котла на газовом топливе. Содержание углекислого газа в дымовых газах на 15-20% ниже, чем при сжигании угля, поскольку газовое топливо образуется в результате конверсии органической части бурого угля. На 80-90% снижается нагрузка на систему пылеулавливания, поскольку основная часть золы капсулируется в полукоксе. Поскольку выбросы в окружающую среду относятся на энергетическую продукцию электростанции, то можно считать, что термококк производится с нулевыми выбросами, что даже отдаленно несопоставимо с экологическими показателями классического производства кокса.

Технологическая готовность. Первый котел, модифицированный для параллельного производства бурого угольного кокса, был сдан в эксплуатацию в 2007 г. К настоящему времени технология прошла длительную апробацию на трех водогрейных котлах мощностью 20 МВт, а также краткосрочно – на паровом котле мощ-

ностью 75 т/ч. Таким образом, данная технология не требует долгосрочной разработки принципиально нового оборудования большой сложности.

Экономика. Технология «Термококк-КС» обеспечивает высокую экономическую эффективность за счет перевода электростанции в режим три-генерации с производством третьего товарного продукта (кроме тепловой и электрической энергии) – буроугольного полукокса марки ПК-Т (полукокк тощий). Это экспортно ориентированный продукт, который является низкотемпературным аналогом углей марки СС и Т с регулируемым содержанием летучих веществ ($V_{daf} = 6-15\%$). Пониженная зольность продукции (8-10%) и влажность (не более 10%) обеспечивают высокую теплоту сгорания на рабочую массу (6500-7000 ккал/кг). Предварительная подсушка угля позволяет увеличить крупность полукокса до уровня минус 10 мм.

На основе выполненных предпроектных оценок, внедрение данной технологии возможно на электростанциях ТГК-13: Минусинская ТЭЦ, Абаканская ТЭЦ, Красноярская ГРЭС-2, Назаровская ГРЭС.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ «ТЕРМОКОКС»

Целый ряд металлургических технологий традиционно использует кусковой кокс в качестве углеродного восстановителя. В первую очередь это относится к электрометаллургии. Дополнительными требованиями в этом сегменте являются: высокая реакционная способность и высокое электрическое сопротивление, которые обеспечивают существенную экономию электроэнергии. У буроугольного полукокса реакционность в 20 раз выше, чем у классического кокса, икратно более высокое сопротивление. Однако он имеет низкую структурную прочность. Эта проблема решена в следующих технологиях.

Полукокк высокого давления (ПКВД) [12, 13]

В 2019 г. была завершена разработка технологии пиролиза угля под давлением, которая устраняет данный недостаток. При нагреве под давлением (до 20 атм.) кусок угля в два раза сокращается в объеме. При этом значительно снижается пористость полукокса, и возрастает его структурная прочность. Низкая пористость обеспечивает пониженное водопоглощение, а также пониженную склонность к самовозгоранию. Эти показатели важны для транспортировки высокорекреационного продукта, а также хранения на складе.

К настоящему времени разработаны технический проект опытно-промышленного блока производства полукокса высокого давления (ПКВД) с размещением на Березовском разрезе (АО «СУЭК»), а также конструкторская документация на реактор пиролиза. Срок окупаемости инвестиций – 3,5 года. Мощность опытного производства – 24 тыс. т в год (шесть реакторов). После запуска опытно-промышленного блока предполагается поставка тестовых партий полукокса на российские предприятия электрометаллургии, главным образом на ферросплавные заводы. После завершения периода тести-

рования продукции на предприятиях России технология будет готова к коммерческому производству, а продукция – к поставке на экспорт, по предварительной оценке – на ферросплавные заводы восточного Китая.

Металлургический брикет МТБ

Для ряда электрометаллургических предприятий требуется кусковой высокорекреационный кокс с повышенной горячей прочностью. С этой целью была разработана технология производства металлургического брикета на основе мелкозернистого буроугольного кокса, полученного по технологии «Термококк-КС». В качестве связующего используется коксующийся уголь с последующей термической обработкой продукта. Для этой цели используются слоевые газификаторы с обратным дутьем, аналогичные газификаторам для производства сорбента, как например, на ранее построенном нами предприятии «Карбоника-Ф» (г. Красноярск).

Проект также привязан к Березовскому разрезу. Для стадии брикетирования используется существующий брикетный цех (проектная мощность – 30 тыс. т в год). К настоящему времени «Норильский никель» уже протестировал две партии металлургического брикета различной модификации по 50 т каждая. Работа продолжается.

Прямое восстановление железа.

Технология «Термококк-Fe» [14, 15]

В течение всей истории черной металлургии для производства стали использовался доменный чугун. И сегодня доменная технология сохраняет лидирующее положение в этой отрасли. Однако последнее десятилетие характеризуется бурным развитием различных версий технологии прямого восстановления железной руды. С одной стороны, это обусловлено трендом к «зеленой» экономике путем замены углерода на водород, получаемый из возобновляемых источников энергии. Однако пока что это очень дорогое решение. С другой стороны, производство металлургического кокса находится на первых позициях в перечне экологически опасных технологий и использует в качестве сырья самые дорогие марки угля.

Основу технологии «Термококк-Fe» составляет безотходная переработка бурого угля методом частичной газификации, которая обеспечивает металлургический процесс газовым топливом и высокорекреационным углеродистым восстановителем по предельно низкой цене. Причем эти компоненты поступают в восстановительную печь в горячем виде, что повышает энергетическую эффективность технологии. Процесс прямого восстановления железорудного концентрата осуществляется во вращающейся печи барабанного типа. Железный порошок после охлаждения в безокислительной атмосфере подвергается магнитной сепарации для очистки от нежелательной примеси и далее направляется в электродуговую плавильную печь для переплавки в чушки или на производство горячебрикетированного железа (ГБЖ).

Экономика. В данной технологии исключаются использование доменного кокса, кислородного дутья, затраты

на окисление железорудного концентрата (окатыши). Единственным необходимым видом сырья, кроме железорудного, является бурый уголь. В несколько раз сокращается продолжительность процесса за счет использования материалов в мелкодисперсном состоянии, а также за счет высокой реакционной термококсы.

Экология. В процессе частичной газификации бурый уголь безотходно превращается в газовое топливо и термококсы, которые направляются в металлургическую печь. Выходящие из печи горячие газы с горючими компонентами дожигаются в котле-утилизаторе с производством тепловой энергии в виде пара или горячей воды. Таким образом, все выбросы технологии относятся на производство энергетической продукции, а процесс получения чугуна не имеет никаких отходов. Нулевая эмиссия углекислого газа позволяет отнести «Термококсы-Fe» к классу «зеленых» технологий.

Отработаны технологические режимы восстановления четырех марок железорудных концентратов и рудных материалов. Конечный продукт по результатам независимой экспертизы представляет собой «передельный чугун». В настоящее время готовятся исходные данные для ТЭО строительства опытно-промышленного предприятия на Дальнем Востоке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Критический анализ традиционных технологий глубокой переработки угля приводит к следующим основным выводам. Переработка угля в моторное топливо и синтез-газы для химической промышленности не имеет перспективы в нашей стране в связи с отсутствием экономической целесообразности, главным образом по причине низкой конкурентоспособности с аналогичными технологиями на базе природного газа и нефти. Внутрицикловая газификация угля не представляет интереса для ведущих энергетических компаний. А главное – в стране отсутствуют потенциальные инвесторы для долгосрочного финансирования работ по созданию практически с нуля отрасли по глубокой переработке угля в жидкие и газообразные продукты.

С общеэкономической позиции угольная промышленность нуждается в повышении эффективности экспорта. И эту задачу можно решить только путем увеличения доли премиальной продукции в экспортной корзине. Для достижения этой цели предлагается использовать термическое обогащение углей энергетических марок, в первую очередь – низкочольных бурых углей Канско-Ачинского бассейна.

Список литературы • References

- Чуханов З.Ф. Производство «угольной нефти». Процесс термического энерготехнологического использования топлив. Сб. науч. тр. ЭНИН им. Г.М. Кржижановского. М., 1984. С. 12-28.
- Школлер М.Б. Полукоксование каменных и бурых углей. Новокузнецк: Инженерная академия России. Кузбасский филиал, 2001. 232 с.
- Энерготехнологическая переработка топлив твердым теплоносителем / И.А. Блохин и др. М.: Светлый СТАН, 2005. 336 с.
- Тау А. Полукоксование углей. М.-Л.: Гостоптехиздат, 1948. 209 с.
- Рапопорт И.Б. Искусственное жидкое топливо. Часть I. Газификация топлив. М.-Л.: Гостоптехиздат, 1949. 330 с.
- Рапопорт И.Б. Искусственное жидкое топливо. Часть II. Синтез моторных топлив из окиси углерода и водорода. М.-Л.: Гостоптехиздат, 1950. 252 с.
- Перспективы развития угольной промышленности в России. Центр социально-экономических исследований, 2020. С. 183.
- Будущее угольной индустрии: рынок России до 2050 г. М.: Яков и партнеры, 2023. С.18.
- Степанов С.Г., Исламов С.Р. Проблемы производства жидкого топлива из угля // Уголь. 2015. № 7. С. 50-53. URL: <http://www.ugolino.ru/Free/072015pdf> (дата обращения: 15.05.2024). Stepanov S.G., Islamov S.R. Problems of Liquid Fuel Production from Coal. *Ugol*. 2015;(7):50-53. Available at: <http://www.ugolino.ru/Free/072015pdf> (accessed 15.05.2024). (In Russ.).
- Химические вещества из угля. М.: Химия, 1980. 616 с.
- Исламов С.Р. Частичная газификация угля. М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Кимерийский центр», 2017. 384 с.
- Логинов Д.А., Черных А.П., Исламов С.Р. Термическая переработка энергетического угля под давлением с получением полукоксы и тепловой энергии // Журнал Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. 2021. № 14(4). С. 399-407. Loginov D.A., Chernykh A.P., Islamov S.R. Thermal processing of thermal coal under pressure to produce semi-coke and thermal energy. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tehnika i tehnologii*. 2021;(4):399-407. (In Russ.).
- Патент № 2725792 Российская Федерация, МПК C10B 49/00 (2006.01). Способ получения кускового карбонизата: № 2019139394 заявл. 04.12.2019: опубл. 06.07.2020 / Исламов С.Р., Логинов Д.А., Черных А.П. 5 с.
- Исламов С.Р. Бурый уголь как основа металлургии нового поколения // Уголь. 2017. № 7. С. 15-19. DOI: 10.18796/0041-5790-2017-7-17-21. Islamov S.R. Brown coal as the basis of ferrous metallurgy of new generation. *Ugol*. 2017;(7):15-19. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2017-7-17-21.
- Патент № 2784924 Российская Федерация, МПК C21B 13/08 (2006.01). Способ получения железа прямым восстановлением: № 2022120463 заявл. 26.07.2022: опубл. 01.12.2022 / Исламов С.Р., Логинов Д.А., Степанов Е.И. 6 с.

Author Information

Islamov S.R. – Doctor of Engineering Sciences, Technical Director, LLC Coal Engineering (SUEK Company), Krasnoyarsk, 660001, Russian Federation, e-mail: IslamovSR@suek.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 26.03.2024

Поступила после рецензирования: 16.05.2024

Принята к публикации: 26.05.2024

Paper info

Received March 26, 2024

Reviewed May 16, 2024

Accepted May 26, 2024