

УДК 662.73

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ГЕНЕРАТОРНЫХ ГАЗОВ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА*

Подгоредецкий Г.С., к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Экстракция и рециклинг черных металлов» (podgs@isis.ru)

Юсфин Ю.С., д.т.н., профессор

Сажин А.Ю., младший научный сотрудник научно-образовательного центра «Инновационные металлургические технологии»

Горбунов В.Б., к.т.н., доцент кафедры «Экстракция и рециклинг черных металлов»

Полулях Л.А., доцент кафедры «Экстракция и рециклинг черных металлов»

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. Из анализа литературных источников сделан вывод о высокой перспективности производства генераторных газов из различных видов твердого топлива. Показано, что при соответствующей подготовке, к различным видам твердого топлива можно отнести такие возобновляемые источники энергии как торф, сапропели и твердые бытовые отходы. Приведены недостатки, присущие современным технологиям производства генераторного газа. Проанализирован опыт производства и использования генераторных газов в черной металлургии. Разработаны критерии, которым должна соответствовать новая технология переработки твердых видов топлива. Показано, что наиболее перспективным направлением развития технологий производства генераторных газов является газификация в барботируемой шлаковой ванне. Приведена схема подготовки и газификации твердых видов топлива в шлаковом расплаве. Проведенные технологические и экономические расчеты показали высокую экономическую эффективность производства генераторных газов в политопливном газогенераторе барботажного типа. Себестоимость производства тепловой и/или электрической энергии при сжигании генераторного газа, полученного из рядового бурого угля, на 35 – 40 % ниже, чем при их производстве при сжигании природного газа.

Ключевые слова: уголь, отходы обогащения углей, торф, сапропели, возобновляемые источники энергии, твердые бытовые отходы, политопливный газогенератор.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-6-393-401

Наиболее перспективным направлением эффективной переработки различных видов твердого топлива является производство генераторного газа. Произведенный генераторный газ может использоваться в качестве:

- энергоносителя для производства электрической и тепловой энергии;
- энергоносителя на предприятиях черной и цветной металлургии;
- основного компонента для производства синтез-газа, синтетических видов жидкого топлива, производства водорода и других химических продуктов.

В пользу газификации угля, также как и использования синтетического природного газа (СПГ) в целом, говорят следующие факты.

- Главным экономическим преимуществом газификации является тот факт, что использование СПГ позволяет повысить эффективность «отда-

чи» одной тонны угля по сравнению с прямым сжиганием на угольных станциях до 60 %.

- Очистка газа перед сжиганием намного дешевле очистки дымовых выбросов угольных станций вследствие существенно более низкого объема.
- Газификация угля и других видов твердого топлива дает возможность производить электроэнергию и получать продукцию при относительно небольших затратах, что обеспечивает конкурентное преимущество на рынке дорогостоящих энергоносителей.
- Электростанции, работающие на газе из угля, требуют больших капитальных затрат (как и любое другое крупное производство). Тем не менее, эксплуатационные затраты на установки газификации угля будут потенциально ниже, чем для обычных угольных станций, поскольку первые более эффективны и не требуют дорогостоящего оборудования для защиты окружающей среды. По мере развития технологии и накопления опыта промышленного получения газа из угля стоимость таких объектов будет снижаться.

* В работе принимал участие Ю.И. Базалинский.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение № 14.278.21.0065 от 20.10.2014 г., уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57814X0065.

- Газ из угля может заменить постоянно дорожающий природный газ, используемый в качестве топлива или сырья.
- При газификации твердого топлива можно извлекать полезные элементы, которые имеют очень высокую рыночную стоимость. Многие угли имеют аномально высокое содержание ряда редких элементов.

Технология газификации угля и других видов твердого топлива имеет стратегическое значение для России, поскольку страна располагает более 20 % мировых запасов этих ценных ресурсов.

Использование каменных углей

В мире широко распространены технологии производства генераторного газа из различных видов углей [1]. При наличии несомненных достоинств этих технологий, связанных, прежде всего, с их промышленным применением, они имеют ряд недостатков. К ним относятся:

- неполное использование органической части углей (недожог);
- образование вторичных отходов, требующих затрат на хранение;
- полная потеря ценных микроэлементов, содержащихся в углях;
- значительный ущерб, наносимый угольной генерацией окружающей среде.

Помимо этого, промышленные технологии газификации углей относятся к капиталоемким, имеющим большие сроки окупаемости. Это, прежде всего, связано с неполным извлечением полезных компонентов, содержащихся в углях, в востребованные товарные продукты, либо с производством попутной низкомаржинальной продукции, такой, как отвальный шлак.

Анализ современной научно-технической литературы показал, что угольная промышленность России является одним из крупнейших источников промышленных отходов. Добыча угля в России за 2013 г. составила 352 млн т [2, 3]. Удельный вес добычи открытым способом составил порядка 70 %. При этом на 1 т угля при открытой добыче образуется до 4 – 5 т вскрышных пород, при подземной (шахтной) добыче – до 0,2 – 0,3 т шахтных пород. Кроме того, при обогащении угля в 2013 г. образовано более 30 млн т твердых отходов, а при сжигании угля на ТЭС около 25 млн т золошлаковых отходов (ЗШО). На сегодня в угольной отрасли скопилось около 15 млрд т антропогенных твердых отходов, из них порядка 70 % в Кузнецком бассейне, а в золоотвалах угольных ТЭС – 1,7 млрд т ЗШО [4, 5].

Обобщая вышесказанное, можно сделать вывод о том, что существующие технологии обогащения, подготовки и сжигания углей несовершенны, приводят к образованию огромного количества вторичных отходов, неполному использованию потенциально полез-

ных компонентов, безвозвратным потерям ценных компонентов – микропримесей.

Возобновляемые источники энергии

В значительно меньшей степени развиты технологии газификации других видов твердого топлива, таких как отходы обогащения углей, торф, сапропели и другие виды возобновляемых источников энергии. Это связано с рядом причин. К ним можно отнести: наличие больших запасов углей, отсутствие экономически эффективных способов переработки низкосортных видов твердого топлива.

Торф – второе по запасам (после каменного угля) органическое топливо России, отнесенное к возобновляемым источникам энергии. Запасы торфа в стране составляют 175,65 млрд т (при условной влажности 40 %) или 61,3 млрд т условного топлива [6].

Запасы сапропеля с естественной влажностью в России оцениваются величиной 38 – 250 млрд м³, с влажностью 60 % (по массе) – 40 – 92 млрд т. Сапропели также можно отнести к возобновляемым источникам энергии [7].

Технологии использования различных возобновляемых источников энергии активно развиваются во многих странах мира, многие из них достигли коммерческой зрелости и успешно конкурируют на рынке энергетических услуг.

Торф, сапропели и горючие сланцы распространены практически на всей территории РФ. Они, безусловно, могут быть использованы в качестве источников энергии. Особенно актуально это для отдаленных регионов Сибири и Дальнего Востока.

Полноценное комплексное использование торфа, сапропелей и горючих сланцев требует разработки специальной технологии переработки. Для их использования в качестве энергоносителей требуется проведение полных комплексных исследований физических кондиций и химических свойств.

К возобновляемым источникам энергии, безусловно, можно отнести твердые бытовые отходы (ТБО). Низшая теплота сгорания ТБО сравнима с теплотой сгорания ряда низкокалорийных видов топлива, применяемых в энергетике. Ежегодно на свалки и полигоны РФ вывозится 140 млн м³, под захоронение последних занято 250 тыс. га (или 2,5 тыс. кв. км) земельных угодий. Всего на учтенных свалках страны накоплено 65 млрд м³ ТБО. В среднем ежегодное увеличение объемов ТБО составляет 2 % и ежегодно на 2,5 – 4,0 % увеличивается площадь землеотводов для захоронения отходов. По данным Росприроднадзора в России только 4 – 5 % ТБО вовлекается в промышленную переработку [8].

В себестоимости тепловой и электрической энергии одной из основных составляющих являются логистические затраты. Эти затраты связаны в основном с территориальным расположением потребителей тепловой

и электрической энергии. Производство тепловой и электрической энергии в отдаленных или труднодоступных районах сопровождается необходимостью завоза жидкого топлива, либо углей, что существенно удорожает производство этих видов энергии. В то же время в этих регионах, как правило, имеются запасы альтернативных видов твердого топлива: торфа, сапропелей и других видов возобновляемого органического топлива. Практически во всех регионах имеются возобновляемые запасы твердых бытовых отходов. Особенно актуальны эти проблемы для отдаленных районов Дальнего Востока и Сибири.

Относительно успешно работающие в промышленном масштабе технологии переработки ТБО не лишены существенных недостатков: необходимостью безопасного хранения вторичных отходов переработки ТБО и долгими сроками окупаемости установок, требующими государственных или муниципальных преференций. В то же время в ходе разработки лучших мировых практик переработки ТБО созданы и опробованы отдельные узлы, такие как узел подготовки ТБО к переработке, совершенные системы газоочистки. Эти удачные технологические решения могут быть использованы во вновь создаваемых технологиях.

Лучшие мировые практики производства генераторных газов

Промышленные технологии газификации углей известны давно. Их условно можно разделить на следующие виды [9, 10]:

- газификация в стационарном слое;
- газификация в кипящем слое;
- газификация в вихревом потоке;
- комбинированные методы;
- газификация в барботируемой шлаковой ванне.

Газификатор Лурги. Одной из старейших технологий, получившей широкое распространение в мире, является технология газификации в стационарном слое по методу Лурги. Газификация по методу Лурги относится к наиболее распространенным способам. Газификация в плотном слое топлива при атмосферном давлении в настоящее время практически утратила свое значение и осуществляется в плотном слое кускового угля при повышенном давлении.

Применение способа ограничено определенными требованиями к сырью:

- размер куска 30 – 50 мм, соотношение максимального и минимального размера частиц не более 2:1;
- спекаемость сырья – отрицательный показатель для данного процесса, так как угли начинают переходить в пластическое состояние, препятствуя движению газов;
- при температуре ниже температуры шлакования золы возможна газификация углей с содержа-

ем золы не более 15 %, особенно при твердом ее удалении.

К недостаткам процесса следует отнести и необходимость извлечения из газа образующихся в зоне термического разложения продуктов. Выходящая из газогенератора парогазовая смесь требует дальнейшей очистки.

Перспективы совершенствования процесса Лурги сосредоточены в основном на создании аппарата с жидким шлакоудалением, подъеме температуры в зоне газификации и обеспечении последующей каталитической конверсии сырого газа [4].

В современных условиях в промышленных масштабах газификация угля осуществляется под давлением 2 – 3 МПа в слое шихты, движущейся противотоком к подаваемым в реактор снизу пару, кислороду и образующемуся газу. Преимуществами данного процесса являются высокая производительность установок и низкий расход кислорода, недостатками – необходимость принимать меры для предупреждения спекания углей, низкая температура получаемого газа и содержание в нем побочных продуктов: смолы аммиака, фенолов. Работы по дальнейшему совершенствованию процесса ведутся в направлении увеличения размеров и энергетической мощности газогенераторов – сооружения генераторов производительностью по углю до 75 т/ч (вместо 50 т/ч для эксплуатируемых в настоящее время), повышения давления (до 10 МПа) и повышения температуры процесса.

В таблице приведено сравнение показателей работы газогенератора Лурги в двух режимах: без расплавления и с расплавлением золы [4].

Показатели работы газогенератора Лурги

Performance indicators of Lurgi gasifier

Показатель	Режим работы	
	без расплавления золы	с расплавлением золы
Расход, объемн. ед.:		
– пара	8,9	1,1
– кислорода	1,0	1,0
Степень использования пара, %	60	100
Производительность по газу, ГДж/(м ² ·ч)	48,3	159,0
Содержание в сыром газе, %		
– CO	24,6	60,6
– H ₂	39,8	27,8
– CO ₂	24,6	2,6
– CH ₄	8,7	7,6
– C _n H _m	1,1	0,4
– N ₂	1,2	1,0
Теплота сгорания газа, ГДж/нм ³	10,9	13,0
Эффективность газификации, %	62,6	68,3

Наряду с ожидаемой более высокой удельной производительностью важным преимуществом газогенератора с выпуском жидкого шлака является возможность газификации углей с низкой реакционной способностью или с низкой температурой плавления золы. Кроме того, обеспечивается возможность варьирования в широких пределах соотношения содержания водорода и оксида углерода в газе. Благодаря резкому сокращению количества непрореагировавшего водяного пара могут быть значительно уменьшены размеры установки для осушки газа.

Газификатор Винклера. Газификация в кипящем слое топлива получила бурное развитие начиная с 20-х годов XX в. Во время второй мировой войны Германия получала синтетическое жидкое топливо большей частью из генераторного газа, производимого в процессах газификации по способу Винклера. До настоящего времени в мире существует около 50 агрегатов, работающих по данному принципу.

Удельная производительность процесса газификации бурых углей в газогенераторах с кипящим слоем при атмосферном давлении достигает 2500 – 3000 кг/(м³·ч), производительность одного агрегата составляет 20 – 45 т/ч.

Требования к сырью в данном процессе менее жесткие, чем в процессе Лурги – возможна газификация высокозольных (до 40 %) и спекающихся углей. Однако предпочтительно использовать угли с достаточно высокой реакционной способностью – бурые угли, реакционно-способные каменные угли, буроугольный кокс и полукокс с размером частиц <10 мм. Интенсивное перемешивание твердых частиц в кипящем слое приводит к практически изотермическому режиму, что облегчает регулирование температуры в реакторе. Степень превращения угля достигает 90 %, что выше, чем для процесса Лурги.

К недостаткам газогенератора Винклера следует отнести:

- необходимость очистки газа от большого количества пыли;
- невысокую температуру газификации;
- большие размеры газогенератора и его металлоемкость;
- высокое содержание углерода в золе (до 10 %) при сухом золоудалении.

Дальнейшее развитие технологии газификации в кипящем слое возможно в направлениях:

- повышение температуры процесса за счет повышения температуры плавления золы введением, например, инертных добавок;
- разработка установок в кипящем слое при повышенном (до 5 МПа) давлении.

Газификаторы Копперс-Тотцек, Шелл-Копперс. Газификатор Копперс-Тотцек относится к процессам газификации в вихревом потоке. Данные процессы осуществляются при высоких давлениях и температурах в прямоточных реакторах при совместной подаче угля с газифицирующими агентами – паром и кислоро-

дом. Преимуществами процессов в вихревом потоке по сравнению с процессами в компактном слое являются возможность использования различных сортов углей, высокая температура получаемого газа и отсутствие в нем смолы и фенола.

Требуется большой объем работ по подготовке угля – измельчению его до нужной крупности. Отрицательным фактором является также замедление скорости реакций на выходе из реактора, в связи с чем становится невозможной полная газификация углерода даже при условии взаимодействия с ним всего кислорода. Степень газификации углерода определяется продолжительностью пребывания реагирующих веществ в реакторе и, следовательно, его размерами. По данным Горного бюро (США), степень газификации углерода процессами в вихревом потоке в каменном угле может достигать 85 %, в буром угле – 95 %. Так, при температуре угля и кислорода 25 °С, температуре пара 820 °С степень газификации углерода бурого угля составляет 90 % [8].

Рабочая температура процесса определяется общим энергетическим балансом, учитывающим тепло экзотермических реакций углерода с кислородом, эндотермических реакций углерода с паром, теплосодержание реагентов и продуктов реакций, а также тепловые потери, состав получаемого газа – смещением равновесия реакции водяного газа. Для обеспечения оптимальных рабочих параметров процесса и высокого содержания CO + H₂ в газе содержание влаги в угле не должно превышать 5 %.

К процессам в вихревом потоке относятся процессы Шелл-Копперс, Тексако, Сааберг-Отто.

Процесс Шелл-Копперс разработан на основе известного процесса газификации угля Копперс-Тотцек и опыта, полученного фирмой Shell, США при газификации мазута под давлением. Он представляет собой автотермический процесс газификации угольной пыли кислородом или воздухом и водяным паром. Уголь после сушки и измельчения (содержание фракции 90 – 0 мкм должно составлять 90 %) под высоким давлением вдувается в реакционное пространство в прямотоке с газифицирующими агентами. Рабочее давление составляет около 3 МПа, температура газа на выходе из реактора 1400 – 1500 °С [8].

Зола выделяется в виде шлака в системе охлаждения под реактором. Содержание углерода в шлаке очень низкое. Остаточная зола выносится из реактора потоком газа в виде летучей золы. Для затвердевания золы на выходе из реактора предусмотрена зона резкого охлаждения газа. Затем газ проходит через котел-утилизатор, где может быть получен перегретый пар давлением до 10 МПа, и очищается от пыли в скруббере мокрой очистки. Содержание пыли в газе снижается до менее 1 мг/м³. Охлажденный и очищенный от пыли газ содержит еще соединения серы, следы аммиака и цианистого водорода, который необходимо удалить в случае использования его в качестве газа-восстановителя.

Показатели работы газогенератора Шелл-Копперс приведены ниже.

Давление, МПа	1,94
Расход:	
угля, т/ч	4,4
кислорода, м ³ /ч	2860
Отношение О/С	1,01
Производство газа, м ³ /ч	9500
Степень газификации углерода, %	99
Содержание в газе, %:	
– СО	65,2
– Н ₂	25,5
– СО ₂	0,8
– Н ₂ S	0,3
– N ₂ и прочих газов	8,2

При вторичном использовании золы можно добиться 100 %-ной газификации угля и всю золу подучить в виде гранулированного шлака.

Процесс газификации пылевидного или жидкого углеродсодержащего сырья кислородом и водяным паром осуществляется при атмосферном или повышенном давлении при 1400 – 1500 °С. Твердое сырье должно быть измельчено до частиц менее 0,1 мм. Иногда в зависимости от вида сырья к нему добавляют частицы более крупного размера. Желательно, чтобы содержание золы в топливе не превышало 40 %.

К недостаткам процесса Шелл-Копперс можно отнести:

- более высокий расход кислорода в сравнении с другими методами газификации;
- затраты на тонкое измельчение топлива;
- необходимость бесперебойной подачи топлива, так как в противном случае из-за малого времени пребывания в реакционной зоне могут возникнуть взрывоопасные смеси при избытке О₂;
- большой унос пыли и очистка от нее продуктов реакции.

Перспективное развитие процесса состоит в следующем:

- разработка вариантов способа при давлении выше 1,5 МПа;
- газификация тяжелых нефтяных фракций и композиций сырья при создании универсальных, регулируемых форсуночных устройств;
- совершенствование процессов очистки сырого газа от пыли;
- повышение термического КПД с 70 – 80 до 90 % за счет усовершенствования утилизации тепла.

Дальнейшее развитие процессов производства генераторного газа из углей идет в направлении развития комбинированных методов.

Технология газификации Коноко-Филипс [9].

Комплексная газификация с комбинированным циклом по технологии газификации Коноко_Филипс (ConocoPhilips) реализована на заводе ConocoPhilips E-GasTM на западе США. Два газогенератора с газификацией в потоке питают две турбины сгорания. Две установки рекуперации тепла и одна паровая турбина обеспечивают дополнительную мощность.

Основным видом топлива является Иллинойский каменный уголь № 6 с высшей теплотой сгорания 27,1 КДж/кг. Коэффициент использования мощностей для завода составляет 80 %. Завод использует улучшенную версию технологии газификации. Два газификатора перерабатывают 5567 т угля/сут. Шлам (63 % массы угля) из шламохранилищ передается в газификатор, разделенный на первичную и вторичную стадию в соотношении 78/22. Кислород производится в криогенных установках разделения воздуха. Угольный шлак и кислород реагируют в газификаторе при давлении 4,2 МПа и высокой температуре (в среднем >1370 °С), в то время как введенная в газификатор часть шлама второй стадии снижает температуру за счет эндотермической реакции газификации.

Газ, выходящий из газификатора, охлаждают в охладителях, производящих пар высокого давления. Охлажденный газ очищается от твердых частиц с помощью циклонного уловителя, содержащего керамические фильтры. Сырой генераторный газ затем дополнительно охлаждают, перед тем как провести очистку от оставшихся твердых частиц и других компонентов в распылительном скруббере. Далее газ проходит через установку по удалению ртути, в которой 95 % ртути поглощается из генераторного газа в колонне с активированным углем. Сероводород (H₂S) удаляется из охлажденного, очищенного от твердых частиц газа потоком раствора Амина (methyldiethanolamine).

Сера восстанавливается в Клаус-секции извлечения серы с использованием кислорода вместо воздуха. Секция производит расплавленную серу путем преобразования около одной трети H₂S в диоксид серы (SO₂), а затем реакцией между H₂S и SO₂ получают серу и воду.

Цикл Брайтона, питаемый генераторным газом, используется с обычным паровым циклом Ранкина для производства электроэнергии с комбинированным циклом. Сжатый азот из блока разделения воздуха используется для разбавления синтетического газа, что помогает свести к минимуму образование оксидов азота (NO_x) при горении в газовой турбине. Две газовые и одна паровая турбина, работающие при 12,4 МПа/566 °С/566 °С формируют основные компоненты завода с комбинированным циклом. Завод производит 623 МВт электроэнергии на выходе. Коэффициент полезного действия завода составляет 39,3 %.

Технологии газификации Сименс. Газификаторы Сименс выполнены в двух модификациях: с охлаждае-

мым кожухом и кожухом с огнеупорной футеровкой [11].

Температура газификации лежит в пределах 1300 – 1800 °С. Условия газификации зависят от характеристик сырья: теплоты сгорания, состава органической части угля, состава летучих угля, состава и температуры плавления золы.

Особенности газификатора Сименс с водяным охлаждением позволяют перерабатывать различные виды твердого топлива:

- широкий диапазон углей;
- кокс;
- биомассу;
- жидкое сырье.

При газификации не образуются смолы и масла, на выходе получается стекловидный шлак. В то же время водяное охлаждение генераторного газа приводит к повышенному содержанию в нем паров воды. Водяное охлаждение кожуха реактора позволяет многократно удлинить срок службы реактора за счет образования слоя защитного гарнисажа.

Газогенератор с футерованным кожухом реактора также имеет ряд преимуществ, таких как высокая степень газификации углерода (>98 %), легкий запуск, низкие эксплуатационные расходы. Однако использование футеровки в реакторе сужает диапазон используемых углей до высококачественных низкотемпературных марок с высокой температурой плавления золы. Другим недостатком газогенератора с огнеупорной футеровкой кожуха является наличие отхода производства – золы.

К комбинированным процессам газификации можно отнести также газификаторы фирмы Шеврон (Chevron Texaco), ныне развиваемые фирмой GE Energy. Уголь или водоугольная суспензия подается в охлаждаемый реактор сверху совместно с кислородным дутьем. Газификация протекает также, как и в газификаторе Сименс в верхнем реакторе. Образующийся шлак выводится совместно с охлаждающей водой. Отличием газификаторов фирмы GE Energy от газификаторов Сименс является наличие водопарового контура охлаждения в нижней части реактора, позволяющем получать дополнительные количества энергетического пара.

Принципиально иная схема газификации углей реализована в разработанном в НИТУ «МИСиС» процессе газификации углей в барботируемой шлаковой ванне – РОМЕЛТ.

Газификатор на базе процесса РОМЕЛТ. Процесс РОМЕЛТ разработан в НИТУ «МИСиС» в 80-х годах прошлого века [12]. Печь построена на Новолипецком металлургическом комбинате в 1984 г. и проведен ее горячий пуск. За период с 1985 по 2000 гг. на опытно-промышленной печи РОМЕЛТ было проведено 40 опытных кампаний. Одним из технологических режимов процесса РОМЕЛТ является режим так называемого

«холодого хода», при котором осуществляется газификация угля в шлаковом расплаве при боковой продувке ванны кислородосодержащим газом без подачи в печь железосодержащего сырья.

Ниже приведены основные особенности процесса РОМЕЛТ.

- Возможность полной газификации в шлаковом расплаве углей различного качества.
- Отсутствие недожога, что делает эту технологию привлекательной для сжигания низкорреакционных углей.
- Уголь не требует предварительного размола или сушки.
- Пылевывнос из реактора-газификатора составляет 2 – 3 % массы загрузки.
- Химические анализы вторичной уловленной пыли и расчеты показывают, что в мелкодисперсной пыли будут концентрироваться германий, рений, галлий, рубидий, цезий и другие металлы, содержащиеся в углях.
- Оксиды азота в газовой фазе непосредственно над ванной шлакового расплава не обнаружены. Их содержание после полного дожигания в котле не превышает 100 м/м³.
- Выбросы серы в атмосферу благодаря взаимодействию со шлаком и образованию вторичных сульфатов не превышают допустимых пределов.
- Содержание O₂ в дутье от 21 до 99,5 %. Можно контролировать калорийность получаемого генераторного газа.

В процессе РОМЕЛТ можно перерабатывать практически любые угли, золы ТЭЦ и другие отходы. Помимо переработки отходов и углей можно получать:

- генераторный газ требуемого химического состава;
- шлак требуемого химического состава;
- концентрат редких и цветных металлов;
- металлический сплав.

Следует отметить, что процесс РОМЕЛТ разработан для производства чугуна из различных видов железорудных материалов и техногенных отходов. Выработка пара (электроэнергии) реализуется в основном за счет охлаждения кожуха реактора, дожигания и охлаждения отходящих из печи газов. Использование процесса РОМЕЛТ в его традиционном виде для газификации углей возможно только при выработке попутной энергии при производстве чугуна. Для создания технологии производства генераторного газа необходима разработка новой технологии и новой конструкции газогенератора.

В целом можно сделать вывод о том, что технологии на базе барботажных процессов могут осуществлять максимально полную переработку твердых видов топлива с комплексным селективным извлечением полезных компонентов в товарные продукты.

Технологии газификации твердого топлива в черной металлургии

Следует отметить, что производство генераторных газов в массовых количествах широко применяется в черной металлургии. Так производство кокса сопровождается значительным выходом попутного коксового газа. Доменную печь также можно отнести к комплексным энергометаллургическим агрегатам, поскольку, помимо чугуна, она производит и доменный газ. Коксовый и доменный газы используются в энергосетях металлургических комбинатов не только в технологических целях, т. е. для нагрева заготовок для проката, обогрева воздухонагревателей, но и для производства тепловой и электрической энергии. На крупных металлургических комбинатах в настоящее время вырабатывается до 40 % потребляемой тепловой и электрической энергии из вторичных газов.

В черной и цветной металлургии продолжается разработка новых процессов экстракции металлов. Многие новые процессы, такие как COREX, HISMELT, HISARNA, в том числе реализованные в промышленных масштабах, используют в своем составе реактор-газификатор.

Основные недостатки промышленных технологий производства генераторных газов, принципы новой технологии

Несмотря на достаточно активное развитие процессов газификации твердых видов топлива в мире, существующие технологии далеки от идеала и им присущи ряд недостатков, к которым можно отнести:

- неполное извлечение всех полезных компонентов в товарные продукты, особенно это актуально для компонентов-микропримесей;
- потребность в значительных капиталовложениях, окупаемых только при строительстве крупных производств;
- ориентация на низкомаржинальные сопутствующие продукты, такие как отвальный шлак;
- недостаточная экологическая чистота технологий, наличие экотоксикантов в продуктах переработки.

Новая технология должна отвечать ряду требований. К ним относятся:

- полная переработка твердых видов топлива без образования вторичных продуктов, требующих дополнительного складирования или захоронения;
- максимально полная нейтрализация особо опасных экотоксикантов, таких как диоксины, фураны и т. д.;
- использование лучших технологических решений мировых практик;

- относительно невысокие капиталовложения;
- возможность прибыльной работы предприятий по переработке твердых видов топлива с приемлемыми сроками окупаемости.

Анализ литературных источников позволил предложить схему газификатора на базе печи барботажного типа.

Схема газификатора на базе печи барботажного типа

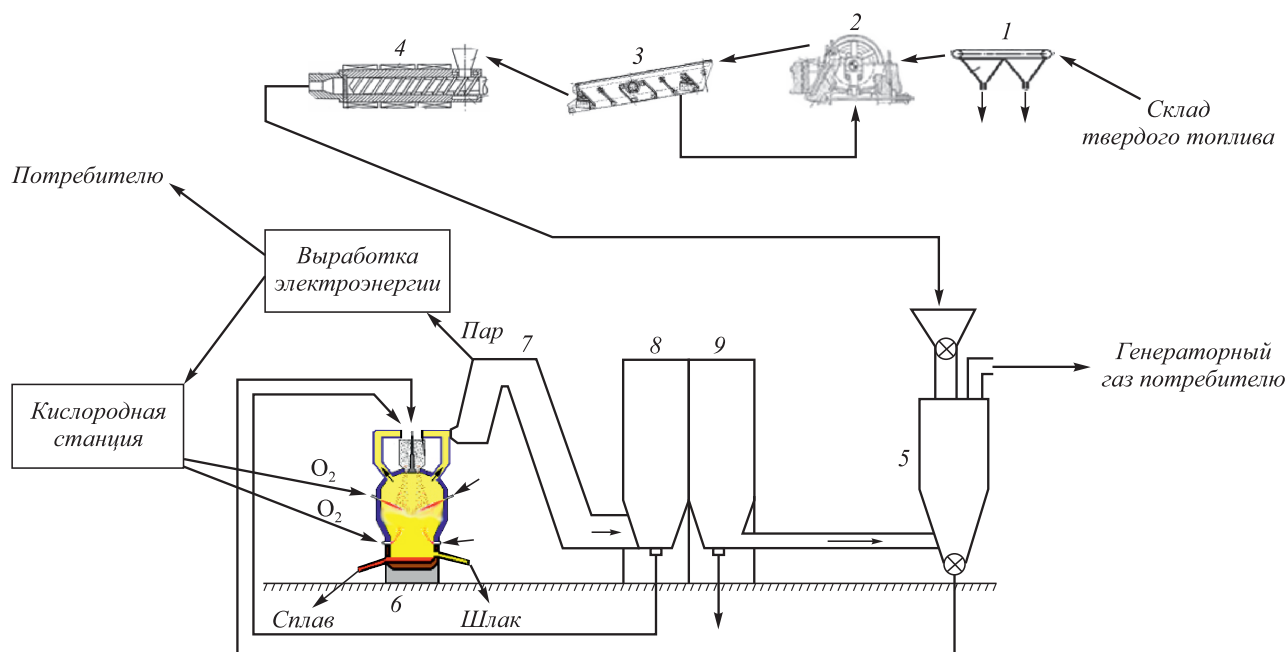
На рисунке приведена технологическая схема политопливного газогенератора.

Предлагаемая схема узлов и агрегатов политопливного газогенератора предназначена для производства генераторных газов из различных видов твердого топлива. Выше было отмечено, что многие виды твердого топлива, включая ТБО, отличаются нестабильным составом. Такие виды твердого топлива, как отходы углеобогащения, торф, сапропели, ТБО содержат от 30 до 60 % воды. Производство генераторных газов из таких материалов потребует использования дополнительных видов топлива. Целесообразно организовать промежуточный склад топлива, где оно будет предварительно подсушиваться и усредняться. В случае необходимости топливо подается на вакуум-фильтры (1), где происходит его предварительное обезвоживание до влажности 20 – 25 %.

Многие виды твердого топлива относятся к мелкодисперсным (менее 1 мм) материалам. Загрузка такого вида материалов в реактор-газификатор будет сопровождаться значительным, до 5 % и более пылеуносом. Для снижения пылеуноса топлива, а также для введения специальных флюсующих и других добавок рекомендуется брикетировать топливо. В качестве брикетирующего оборудования предлагается использовать экструдеры (4), позволяющие при незначительных затратах производить брикеты нужной формы и размера.

При переработке низкокалорийных видов топлива их газификация без досушивания до влажности 5 – 10 % потребует введения дополнительных видов другого высококалорийного топлива. Предлагается подсушивать брикеты до требуемой влажности в сушилке для брикетов (5).

Далее брикеты подаются в печь с барботируемым кислородсодержащим газом шлаковым расплавом (7). В печи при температуре 1450 – 1600 °С происходит газификация твердого топлива. Углерод, органические составляющие, а также вода переходят в газообразное состояние и образуют генераторный газ. Далее газ охлаждается в котле-охладителе и поступает в газоочистку (8, 9). После двухстадийной газоочистки крупная фракция пыли возвращается на дозирование и вводится в брикеты. Мелкая фракция пыли поступает на переработку на предприятия цветной металлургии. Очи-



Технологическая схема политопливного газогенератора:

1 – вакуум-фильтры; 2 – дробилка; 3 – грохот; 4 – экструдер; 5 – сушилка для брикетов; 6 – печь с барботируемым шлаковым расплавом; 7 – котел-утилизатор; 8 – грубая газоочистка; 9 – тонкая газоочистка

Technological scheme of polyfuel gasifier:

1 – vacuum filters; 2 – crusher; 3 – cribble; 4 – extruder; 5 – briquettes dryer; 6 – furnace with bubbling slag melt; 7 – exhaust-heat boiler; 8 – rough gas-cleaning; 9 – thin gas-cleaning

щенный и охлажденный генераторный газ передается потребителям.

Помимо газа в печи происходит образование шлака и (если это целесообразно) металлического сплава. Жидкие продукты плавки периодически выпускаются из печи. Химический состав шлака регулируется флюсующими добавками. Далее он поступает на грануляцию, либо производство шлакокаменного литья. Металлический продукт, в зависимости от его состава, передается потребителям на предприятия черной или цветной металлургии.

В ходе разработки технологической схемы политопливного газогенератора разработаны секреты производства, зарегистрированные как «Ноу-хау» в депозитории НИТУ «МИСиС».

На основании предложенной схемы политопливного газогенератора проведены предварительные расчеты себестоимости производимого генераторного газа. При цене твердого топлива на уровне 1500 руб. и расходе кислорода по цене 3000 руб/нм³ порядка 100 нм³ на 1000 нм³ генераторного газа, содержащего 85 – 90 % CO + H₂, себестоимость 1000 нм³ газа составит 550 – 750 руб. В пересчете (по калорийности) на природный газ его себестоимость составит 1700 – 2300 руб. за 1000 нм³, что на 40 – 60 % ниже цены природного газа. Использование такого генераторного газа для производства тепловой и электрической энергии снизит их стоимость на 35 – 40 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. BP Statistical Review of World Energy June 2014.
2. Долгосрочная программа развития угольной промышленности России на период до 2030 г. (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 24 января 2012 г. № 14-р).
3. Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации. <http://www.minenergo.gov.ru>.
4. Литвинов А.Р., Харионовский А.А. Состояние окружающей среды в угольной промышленности // Уголь. 2012. № 10. С. 74 – 79.
5. Гринько Н.Х. Охрана окружающей среды в горнодобывающих отраслях на примере угольной промышленности // Уголь. 2013. № 11. С. 30 – 33.
6. Назаров А.К., Оспенникова Л.А., Ямпольский А.Л. Об оценках запасов торфа Российской Федерации // Торф и Бизнес. 2006. № 4(6). С. 8 – 11.
7. Перминова И.В., Жилин Д.М. Гуминовые вещества в контексте зеленой химии. – В кн.: Зеленая химия в России. – М.: Изд-во МГУ, 2004. 146 – 162.
8. Ложечко В.П., Крицын М.С. О методах получения альтернативного топлива из твердых бытовых отходов // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 3-й Международ. науч.-практ. конф. / Под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. С. 982 – 991.
9. Юсфин Ю.С., Пашков Н.Ф. Металлургия железа: Учебник для вузов. – М.: Академкнига, 2007. – 464 с.
10. <http://www.gasification.org/gasification-applications/overview/>
11. http://www.energy.siemens.com/hq/en/industries-utilities/oil-gas/products-systems-solutions/power-generation.htm?stop_mobi=true
12. Процесс Ромелт / Под ред. В.А. Роменца. – М.: МИСиС, Издательский дом «Руда и Металлы», 2005. – 400 с.

Поступила 20 мая 2015 г.

MANUFACTURING TRENDS OF GENERATOR GASES FROM DIFFERENT TYPES OF SOLID FUEL

Podgorodetskii G.S., *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair “Extraction and recycling of ferrous metals”* (podgs@isis.ru)

Yusfin Yu.S., *Dr. Sci. (Eng.), Professor*

Sazhin A.Yu., *Junior Researcher*

Gorbunov V.B., *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Extraction and recycling of ferrous metals”*

Polulyakh L.A., *Assist. Professor of the Chair “Extraction and recycling of ferrous metals”*

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS)
(4, Leninskii ave., Moscow, 119049, Russia)

Abstract. It was concluded from the literature analysis that the production of generator gases from various types of solid fuel has high prospects. The various types of solid fuel with appropriate preparation may include renewable energy sources such as peat, sapropel and municipal solid waste. The authors described disadvantages of modern technologies of production of generator gases and analyzed experience of the production and use of them in the steel industry. The criteria to be met by the new technology of solid fuels were worked out. Therefore, the most promising direction of development of generating gas production technology is the gasification into bubbling slag bath. The scheme of preparation and gasification of solid fuels in the melted slag is described. The conducted technological and economic calculations have shown high economic efficiency of generator gases production in poly-fuel gas generator of bubbling type. The production cost of the thermal and / or electrical energy by burning of generator gas produced from raw brown coal is up to 35 – 40 % lower than during their production from natural gas combustion.

Keywords: coal, waste of coal enrichment, peat, sapropel, renewable energy, solid waste, polyfuel gasifier.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-6-393-401

REFERENCES

1. *BP Statistical Review of World Energy*, June 2014.
2. *Dolgosrochnaya programma razvitiya ugol'noi promyshlennosti Rossii na period do 2030 goda (utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 24 yanvarya 2012 g. № 14-r)*. (In Russ.).
3. *Ofitsial'nyi sait Ministerstva energetiki Rossiiskoi Federatsii*. Available at URL: www.minenergo.gov.ru. (In Russ.).
4. Litvinov A.R., Kharionovskii A.A. The conditions of environment in the coal industry. *Ugol'*. 2012, no. 10, pp. 74–79. (In Russ.).
5. Grin'ko N.Kh. Environmental protection in mining sector on the example of the coal industry. *Ugol'*. 2013, no. 11, pp. 30–33. (In Russ.).
6. Nazarov A.K., Ospennikova L.A., Yampol'skii A.L. The estimation of peat reserves of the Russian Federation. *Torf i Biznes*, 2006, no. 4(6), pp. 8–11. (In Russ.).
7. Perminova I.V., Zhilin D.M. *Humin substances in the context of green chemistry*. In: *Zelenaya khimiya v Rossii* [Green Chemistry in Russia]. Moscow: Izd-vo MGU, 2004. (In Russ.).
8. Lozhechko V.P., Kritsyn M.S. On the production methods of the alternative refuse derived fuel. In: *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: materialy 3-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Modern engineering. Science and Education: Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference]. Radkevich M.M., Evgrafov A.N. eds. St. Petersburg: Izd-vo Politekhn. Un-ta. 2013, pp. 982–991. (In Russ.).
9. Yusfin Yu.S., Pashkov N.F. *Metallurgiya zheleza: uchebnik dlya vuzov* [Metallurgy of iron: Textbook for universities]. Moscow: IKTs “Akademkniga”, 2007, 464 p. (In Russ.).
10. *Gasification Technologies Council (GTC) official web-site. Gasification Applications*. Available at: <http://www.gasification.org/gasification-applications/overview/>
11. *Siemens official web-site. Solutions for Power Generation*. Available at: http://www.energy.siemens.com/hq/en/industries-utilities/oil-gas/products-systems-solutions/power-generation.htm?stop_mobi=true
12. *Protsess Romelt* [Romelt process]. Romanets V.A. ed. Moscow: MISiS, Izdatel'skii dom “Ruda i Metally”, 2005. (In Russ.).

Abstract. The work was performed with the participation of Bazalinskii Yu.I.

This work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, the agreement no. 14.278.21.0065 from 20.10.2014, at the unique identifier of the agreement RFMEFI57814X0065.

Received May 20, 2015