

ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКАЯ ГАЗИФИКАЦИЯ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

Афанасьев В.В.¹, Ковалев В.Г.¹, Тарасов В.А.¹, Орлов В.Н.¹

¹ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», Чебоксары, Россия (428015, Чебоксары, Московский пр., 15), e-mail: pro_nauch@chuvsu.ru

Проведены теоретические и экспериментальные исследования физико-химических механизмов аллотермической газификации и пиролиза твердого топлива с применением электронагрева. Электрошлаковые технологии позволяют преобразовать любые низкосортные твердые топлива в синтез-газ, который может быть использован в энергетических, металлургических и химических технологиях. Определены основные характеристики процессов термоэлектрической газификации твердых топлив и электрические режимы работы электротермических установок для переработки твердых топлив. Показана возможность создания электротермических газогенераторов с высокими технико-экономическими показателями. Установки электрошлаковой газификации могут эффективно использовать дешевую электроэнергию в ночные часы для выработки дорогостоящей продукции (ферросплавов) и работать на «рынке системных услуг» как регулируемая нагрузка. Исследованы возможности использования синтез-газа для стабилизации горения факела пылеугольных котлов и определены основные параметры термоэлектрического газификатора.

Ключевые слова: энергоэффективность, комплексное использование сырья, безотходные технологии, низкосортное твердое топливо, пиролиз, термоэлектрическая газификация, математическое моделирование, физическое моделирование, шлаковосстановительные процессы, синтез-газ.

ELECTRO-THERMAL GASIFICATION OF SOLID FUEL

Afanasyev V.V.¹, Kovalev V.G.¹, Tarasov V.A.¹, Orlov V.N.¹

¹Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary, Russia (428015, Cheboksary, Moskovskiy pr.,15), e-mail: pro_nauch@chuvsu.ru

Theoretical and experimental studies of physical and chemical mechanisms allothermal gasification and pyrolysis of solid fuels with electric heating were conducted. Electroslag technologies allow to convert any low-grade solid fuels into synthesis gas, which can be used in power engineering, metal industry and chemical technologies. The main characteristics of the thermoelectric processes of gasification of solid fuels and electric modes of electrothermal facilities operation for solid fuels processing were determined. Possibility of creating electrothermal gas generator with high technical and economic indicators was shown. Electroslag gasification facilities can effectively use cheap electricity at night time to produce high-value products (ferro-alloys) and work on the "system services market" as adjustable load. Possibility of using the synthesis gas to stabilize flame burning coal-fired boilers and the main parameters of thermoelectric gasifier were studied.

Keywords: energy efficiency, integrated use of raw materials, waste technologies, low-grade solid fuels, pyrolysis, gasification thermoelectric, mathematical modeling, physical modeling, shlakovosstanovitelnye processes, synthesis gas.

Вовлечение сырьевых и энергетических ресурсов в технологические процессы непрерывно увеличивается, получение их обходится всё дороже, а загрязнение окружающей среды принимает планетарные масштабы. Поэтому разработка энерготехнологических комплексов с созданием малоотходных и безотходных технологий и рациональное использование вторичных материальных и энергетических ресурсов становится все более актуальной и требует межотраслевых знаний и подходов. С истощением запасов нефти и природного газа основными источниками восполнения энергобаланса могут стать уголь, а в отдельных регионах горючие сланцы, торф и биомасса. Необходимы малоотходные технологии получения из этих видов энергоносителей не только тепловой и электрической энергии, но и промежуточных синтетических углеводородных жидких и газообразных

продуктов с глубоким использованием горючей и минеральной части. Газообразные и жидкие виды топлива позволяют накапливать их, эффективно транспортировать и автоматизировать использование в котельных, производить не только тепловую, но и электрическую энергию с более низкими затратами. Твердые виды топлива без их перевода в газообразное или жидкое состояние принципиально не могут быть использованы в наиболее современных технологиях энергетической генерации (газотурбинные, газопоршневые, парогазовые установки).

Необходимы новые технологии получения из твердых видов топлив не только тепловой и электрической энергии, но и промежуточных синтетических углеводородных жидких и газообразных энергоносителей, а также извлечения из минеральной части металлов или сырья для строительных технологий [1]. Экологически чистые процессы трансформации твердого топлива в электрическую и тепловую энергию решают задачу комплексного освоения сырья, значительного сокращения отходов и вредных выбросов в атмосферу.

Применение различных технологий газификации, при которых происходит преобразование твёрдого топлива в газообразное, позволяет эффективно использовать значительные запасы низкосортного твердого топлива и расширить область его применения для любых теплофикационных и энергетических установок, а также для получения синтез-газа для химической промышленности [1]. Поэтому актуальной задачей является исследование возможностей создания энерготехнологических комплексов по глубокой переработке твердых видов углеродосодержащего сырья.

Важным вопросом при разработке энерготехнологических процессов является выбор технологии и оценка эффективности работы энерготехнологического комплекса. Известны два способа термической переработки твердого топлива с получением горючего газа: с подводом тепла извне (аллотермические) и с получением тепла в процессе газификации за счет сжигания части топлива (автотермические). Последний способ имеет преимущественное применение, однако при этом до 40 % топлива затрачивается на поддержание температуры процесса. Аллотермические газогенераторы с внешним подводом энергии для нагревания топлива и его газификации в настоящее время находятся в стадии экспериментальных исследований.

В случае использования для создания высоких температур химической энергии, запасенной в твердых видах топлив (автотермический процесс), возможно проведение газификации угля в шлаковом расплаве при подаче кислорода [6]. При этом окисляется часть углерода, а минеральная составляющая топлива переходит в шлак. Это позволяет уменьшить содержание оксидов серы в генераторном газе, связав серу в шлаке с оксидом кальция. Однако в автотермическом процессе газификации угля ограничена температура расплава

шлака, что делает процесс неустойчивым при изменении состава сырья, при попадании в газификатор пустой породы, создает затруднения при сливе шлака. Процесс требует непрерывной подачи в шлак угля и кислорода.

Электротермические технологии благодаря возможности управляемого введения в рабочее пространство большой удельной мощности, достижения высоких температур, обеспечивают следующие технологические преимущества:

- интенсификацию всех технологических процессов вследствие высокой температуры и электромагнитного перемешивания жидких фаз;
- возможность создания в рабочем пространстве любого состава атмосферы с достижением окислительной, восстановительной или нейтральной среды;
- возможность регулировать производительность установки и потребление электроэнергии в широких пределах без нарушения технологического процесса.

В Чувашском государственном университете была предложена, опробована и запатентована аллотермическая технология газификации твердых видов топлив в шлаковом расплаве – электрошлаковая газификация [7].

Принципиальным отличием электрошлаковой технологии от автотермических технологий газификации является возможность создания восстановительной атмосферы в рабочей зоне газификатора и восстановления оксидов железа, кремния и марганца из минеральной части топлив. По сравнению с плазменной технологией газификации электрошлаковая газификация не требует пылеприготовления и позволяет использовать не измельченное топливо, сократить выбросы оксидов серы, в широких диапазонах регулировать производительность получения генераторного газа, изменяя подачу топлива, окислителей и электроэнергии. Теплотворная способность генераторного газа, как и в плазменной технологии, составляет около $11,5 \text{ МДж/м}^3$, что в три раза меньше чем у природного газа. Однако количество отходящих дымовых газов при сжигании генераторного газа и расход воздуха практически такие же, как и при сжигании природного газа. Это принципиально позволяет использовать электрошлаковую газификацию для резервирования природного газа (взамен топочного мазута) в энергетических котлах ТЭЦ или ГРЭС. На основе таких газификаторов возможно создание распределенных систем энергообеспечения, в удалении от населенного пункта можно вырабатывать генераторный газ, а преобразовывать его в электрическую и тепловую энергию в центрах нагрузок.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования физико-химических механизмов термоэлектрической газификации и пиролиза твердого топлива с применением электронагрева. Создан экспериментальный стенд для исследования процессов газификации углеродосодержащих твердых видов топлива с применением электронагрева. Для

исследования процессов сушки, пиролиза и полукоксования использована герметичная электропечь сопротивления. Установка для исследования процессов электрошлаковой газификации твердого топлива с использованием дугового и резистивного нагрева представляет собой одноэлектродную печь постоянного тока с круглой ванной и металлическим подом. Ванна печи имеет футеровку из огнеупорного кирпича, внутри которой размещается графитовый тигель, который позволяет проводить газификацию при наличии в рабочем пространстве расплавленного шлака. Электрический режим при наличии шлака стабилизируется, интенсифицируются все процессы, минеральная часть сырья переходит в шлак.

Экспериментальная установка позволяет исследовать процессы газификации любых видов твердого топлива при различных электрических и технологических режимах работы, уточнять математические модели материальных и энергетических балансов, отбирать пробы генераторного газа для определения его химического состава.

В электродной установке термоэлектрической газификации за счет преобразования электрической энергии в тепловую можно обеспечить температуру, достаточную для протекания процессов восстановления углеродом оксидов, содержащихся в минеральной части твердого топлива и подаваемых дополнительно, с образованием металлического сплава.

По результатам математического моделирования и экспериментальных исследований определены основные характеристики процессов термоэлектрической газификации твердых топлив и рассчитаны электрические режимы работы электротермических установок для переработки твердых топлив [3,5]. Исследование характеристик технологий переработки твердого топлива в электротермических установках показало возможность создания аллотермических газогенераторов с высокими технико-экономическими показателями [2].

При температуре выше 1300 К генераторный газ практически состоит из водорода и оксида углерода. При более высокой температуре равновесный состав генераторного газа почти не меняется. Весь углерод поступает из газифицируемого сырья, водород может поступать как из горючей массы сырья, так и из водяного пара, который образуется из влаги сырья и может подаваться дополнительно.

Расчеты равновесия в системе, содержащей оксид и диоксид углерода, водород и водяной пар, показали, что при изменении температуры от 1300 К до 300 К состав смеси меняется незначительно. Следовательно, при охлаждении генераторного газа его состав существенно не изменяется. Поддержание в зоне газификации достаточно высокой и стабильной температуры с применением электронагрева позволяет перевести горючую массу

низкосортного твердого топлива в высококалорийный синтез-газ, свободный от азота, диоксида углерода и водяных паров [1].

Результаты расчетов и экспериментов показывают, что для эффективной термоэлектрической газификации температура в реакционной зоне должна быть более 1300 К и в этой зоне должна выделяться достаточная мощность [8,9]. Электронагрев позволяет обеспечить такую высокую температуру и достаточное выделение мощности.

Исследованы физико-химические процессы при комплексной переработке твердых видов топлива в энергетических и металлургических циклах. Энерготехнологический комплекс металлургического направления подразумевает возможность работы электрошлакового газификатора в восстановительном режиме при низкой стоимости электрической энергии в ночные часы, выходные или сезонно. В электрошлаковый газификатор отдельно подают топливо и руду. Для получения оксида углерода используется кислород, содержащийся в руде оксидов. На выходе газификатора получают несколько продуктов: восстановленный металл (ферросплав), генераторный газ и шлак, из которого можно получить строительные материалы. В часы максимума энергопотребления газификатор может переходить в режим работы с ограничением подачи руды и продувкой расплава шлака и угольного слоя кислородом, что позволит работать с низким потреблением электрической энергии. На экспериментальной установке успешно опробован режим перехода на автотермический режим газификации без потребления электроэнергии, что позволяет оптимизировать график нагрузки [5]. Установки электрошлаковой газификации могут эффективно использовать дешевую электроэнергию в ночные часы для выработки дорогостоящей продукции и работать на «рынке системных услуг» как регулируемая нагрузка, позволяя по требованию системного оператора снижать потребление электрической энергии до 5 и более раз без снижения производительности по генераторному газу. Исследования материальных и энергетических балансов процессов электротермической газификации показали, что для любых видов твердого топлива энергетический потенциал генераторного газа, полученного электротермической газификацией в электродных установках, в несколько раз превышает затраты электроэнергии на газификацию.

Использование для технологий газификации плазменного нагрева [10] обеспечивает значительную интенсификацию процесса. В плазменном газификаторе при температуре 2000...4000К происходит полная газификация любого твердого топлива, однако удельный расход электроэнергии при плазменной газификации составляет более 18 МДж/кг топлива, что в 2...4 раза больше, чем при электрошлаковой газификации в электродных установках. Повышенный расход электроэнергии вызван необходимостью нагрева всех компонентов до весьма высоких температур, хотя для полной газификации углерода достаточно температуры

1200К. Серьезным ограничением плазменных технологий является продолжительность работы плазмотронов, поскольку в энергетических установках стойкость плазмотрона должна составлять тысячи часов.

В мировой и отечественной теплоэнергетике при растопке пылеугольных котлов и для стабилизации горения (подсветки) пылеугольного факела используют природный газ или топочный мазут. Подсветка пылеугольного факела необходима при использовании каменных углей с выходом летучих менее 20 %. В местах, где отсутствует природный газ, при растопке пылеугольных котлов и для стабилизации горения пылеугольного факела используют топочный мазут.

В связи с этим разработка безмазутной подсветки пылеугольного факела является весьма актуальной задачей. Известны способы безмазутной подсветки пылеугольного факела с помощью электродуговых нагревателей газа – плазмотронов [10]. Высокая температура плазмы приводит к прогреву топлива со скоростью $10^3 \dots 10^4$ К/с, при этом достигается конечная температура частиц 1100...1200 К и выше, что интенсифицирует разложение органической части топлива. Применение плазмотронов позволяет обеспечить более равномерное и устойчивое горение факела, чем при мазутной подсветке. Светимость пламени заметно выше, чем при мазутном сопровождении. Однако продолжительность работы электродов плазмотрона до замены составляют всего лишь – 50–100 часов, что не сопоставимо временем работы энергетического котла.

Эти недостатки можно устранить с помощью использования для подсветки пылеугольного факела синтез-газа, полученного газификацией основного топлива-угля. Существующие технологии автотермической газификации твердого топлива не обеспечивают полную газификацию тощих каменных углей с малым выходом летучих и стабильный непрерывный выход синтез-газа. Необходимыми качествами производства синтез-газа для подсветки пылеугольного факела обладает аллотермическая электротермическая газификация твердого топлива. Синтез-газ может быть получен с помощью электротермической газификации основного энергетического угля [4]. Теоретическая температура горения синтез-газа 2270 К. Расчет на математической модели времени нагрева в потоке горячего газа частиц угля показал, что нагрев частиц угля в продуктах горения синтез-газа происходит также интенсивно, как и в струе плазмы.

Для анализа механизма и кинетики процессов при пиролизе и газификации твердых топлив были применены неизотермические методы, базирующиеся на применении дериватографа. Были подобраны условия для проведения термического распада образцов топлива в условиях линейного нагрева и проведена замена системы регистрации результатов в аналоговой форме на цифровую систему сбора данных, использующую возможности

современной вычислительной техники. Цифровая система сбора данных, дополненная подпрограммами обработки полученной информации, позволила повысить точность определения измеряемых параметров процесса термораспада, значительно облегчить проведение кинетического анализа результатов эксперимента и увеличить наглядность представления результатов.

Заключение

Проведены теоретические и экспериментальные исследования физико-химических механизмов термоэлектрической газификации твердого топлива с применением электронагрева. Исследованы процессы термоэлектрической газификации в лабораторной электропечи постоянного тока, определены параметры электротехнологических режимов. По результатам исследований определены основные характеристики процессов термоэлектрической газификации твердых топлив, показана возможность создания электротермических газогенераторов с высокими технико-экономическими показателями.

Исследования показали, что установки электрошлаковой газификации могут эффективно использовать дешевую электроэнергию в ночные часы для выработки дорогостоящей продукции (ферросплавов) и работать на «рынке системных услуг» как регулируемая нагрузка. Исследованы возможности использования синтез-газа, полученного в электротермическом газификаторе, для стабилизации горения факела пылеугольных котлов.

Результаты исследований используются в учебном процессе при проведении занятий, подготовке выпускных квалификационных работ и диссертаций.

Список литературы

1. Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасов В.А. Анализ технологий газификация твердого топлива // Вестник Чувашского университета. – 2010. – № 2. – С. 194-205.
2. Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасов В.А. Технологические характеристики электротермической газификации различных видов твердого топлива // Вестник Чувашского университета. – 2011. – № 3. – С. 33-39.
3. Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасов В.А. Определение параметров электрического режима установок электрошлаковой газификации // Вестник Чувашского университета. – 2012. – № 3. – С. 93-100.
4. Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасов В.А., Алексеев С.Н. Исследование возможностей использования синтез-газа для стабилизации горения факела пылеугольных котлов // Вестник Чувашского университета. – 2012. – № 3. – С. 100-104.

5. Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасов В.А., Тарасова В.В. Исследование электрических режимов электротехнологического газификатора // Вестник Чувашского университета. – 2013. – Т. 3. – С. 169-176.
6. Баласанов А. В., Усачев А. Б., Лехерзак В. Е., Валавин В. С., Похвиснев Ю.В., Роменец В. А. Способ металлургической многоцелевой газификации твердого топлива // Патент РФ №200912290/02.2010. Бюл. №18.
7. Ковалев В.Г., Афанасьев В.В., Тарасов В.А. Способ газификации углеродосодержащих твердых видов топлива//Патент РФ № 2012139762.2014. Бюл. №19.
8. Тарасов В.А. Возможности повышения энергоэффективности рудовосстановительных процессов за счет использования энергетического потенциала шихтовых материалов // Вестник Чувашского университета. – 2006. – № 2. – С. 278-284.
9. Тарасов В.А., Ковалев В.Г., Лоскутов В.И. Газификация твердых видов топлива с применением электронагрева // Вестник Чувашского университета. – 2007. – № 2. – С. 170-178.
10. Чередниченко В.С., Аньшаков А.С., Кузьмин М.Г. Плазменные электротехнологические установки: учебное пособие для вузов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – 508 с.

Рецензенты:

Абруков В.С., д.ф.-м.н., профессор, ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», г. Чебоксары;

Ефремов Л.Г., д.э.н., ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», г. Чебоксары.