УДК 620.91:662.76.032

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ СИНТЕЗ-ГАЗОВ ИЗ ВЫСОКОРЕАКЦИОННЫХ ТОПЛИВ

Рыжков А.Ф., Силин В.Е., Попов А.В., Богатова Т.Ф., Вальцев Н.В.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, Екатеринбург, Россия

Работы проводятся при финансовой поддержке РФФИ (грант «РФФИ-Урал» №10-08-96054)

АННОТАЦИЯ

В ходе работ определены температурные границы и интервалы массовых концентраций горючих элементов и окислителя, в которых процесс газификации низкосортных топлив характеризуется повышенной эффективностью конверсии, и внутри которых находится многопараметрический оптимум, обеспечивающий режим безостаточной конверсии в полезные продукты.

В лабораторных условиях реализованы процессы окислительного пиролиза, газификации в режимах, необходимых для получения газов заданного состава, исследована кинетика термохимической конверсии биотоплив и продуктов их термообработки в условиях температур, типичных для огневого процесса в карбонизаторах и газификаторах.

Представлены результаты отработки решений устройств термохимической конверсии органического топлива для современных твердотопливных парогазовых установок с КПД электрическим более 48% и коэффициентом готовности более 95%, мало- и среднетоннажных предприятий по производству синтетического жидкого топлива и товарного кокса.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие мирового топливно-энергетического комплекса идет по пути увеличения доли угля и вовлечения сланцев, газогидратов, битуминозных песков и ТБО в выработку вторичных энергоносителей (жидкое и водородное топливо, электрическая и тепловая энергия, бытовой газ) и химических продуктов (аммиак, сера и пр.) на фоне ужесточения экологических норм.

Процессы термохимической переработки твердых топлив в искусственные газы (газификация, пиролиз) становятся одними из главных компонент современной угольной технологии, которая развивается по двум направлениям: а) с жёсткими экологическими требованиями – на кислородном дутье для крупнотоннажной газохимии и электрогенерации с депонированием CO_2 в перспективе; б) с упрощенными экологическими требованиями – на воздушном дутье, применимые как в области энергетики, так и при производстве жидких моторных топлив.

Большинство регионов России являются импортозависимыми в части топливно-энергетического баланса (например, доля местных топлив в ТЭБ Свердловской области 5%). Необходимо активное вовлечение местного топливного потенциала регионов (в европейской части РФ представленного в основном биомассой и торфом, а на восточных территориях – низкосортными углями) в технологию и энергетику на базе процессов термохимической переработки твердых топлив в искусственные газы.

Наиболее реальным и востребованным в России, а главное – доступным отечественному машиностроению – представляется воздушная конверсия твердых топлив с получением воздушного синтетического газа для его последующей трансформации в жидкое моторное топливо, электрическую энергию и другие энергоносители.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ

В УрФУ совместно с Инженерным центром энергетики Урала предприятием «УралОРГРЭС» ведется отработка конструктивных и схемных решений для создания силами отечественного энергомашиностроения устройств термохимической конверсии органического топлива для современных твердотопливных парогазовых установок с КПД электрическим более 48% и коэффициентом готовности более 95%, мало- и среднетоннажных предприятий по производству синтетического жидкого топлива и товарного кокса. Выполнение проекта обеспечит практический задел для создания установок конверсии местных топлив (ПГУ до 100-200 МВт электрической мощности, заводы

© Рыжков А.Ф., Силин В.Е., Попов А.В., Богатова Т.Ф., Вальцев Н.В.

синтетического жидкого топлива до 400-500 тыс. тонн/год) с высокими показателями эффективности и надежности, а также полигенерационных комплексов для совместной выработки энергии и СЖТ, что является «магистральным» направлением развития чистых угольных технологий за рубежом.

В ходе работ расчетным путем определены температурные границы и интервалы массовых концентраций горючих элементов и окислителя, в которых процесс газификации низкосортных топлив характеризуется повышенной эффективностью конверсии, и внутри которых находится многопараметрический оптимум, обеспечивающий теоретически «идеальный» режим безостаточной конверсии в полезные продукты [1].

Энергетические топлива подразделены на две группы: «А» – конвертируемые в идеальную смесь ($CO+H_2$) за счет собственных энергетических ресурсов (в автотермическом режиме) и топлива группы «Б», идеальная газификация которых требует подвода энергии извне (алло- автотермический режим), а в случае автотермического процесса газ содержит значительное количество продуктов полного сгорания (CO_2 и H_2O). Древесина, торф и ряд высоковлажных бурых углей относятся к группе «Б». В пределах группы «А» идеальная газификация характеризуется неизменностью теплоты сгорания газа и химического КПД конверсии топлива в синтез-газ, причем, если высокометаморфизированные топлива нуждаются в значительной добавке водяного пара, то для бурых углей основным источником молекулярного водорода является топливный водород [2].

В лабораторных условиях реализованы процессы окислительного пиролиза, газификации в режимах, необходимых для получения газов заданного состава, исследована кинетика термохимической конверсии биотоплив и продуктов их термообработки [3] в условиях температур, типичных для огневого процесса в карбонизаторах и газификаторах.

Карбонизация (окислительный пиролиз) осуществлена в двух вариантах: в условиях дефицита кислорода и в условиях свободного доступа кислорода воздуха к частице. Газификацию осуществляли в плотном слое в автотермическом режиме с охранным нагревом на воздушном и паровоздушном дутье, в аллотермическом режиме на паровом и углекислотном дутье. Для промежуточных и конечных продуктов конверсии изучены физико-механические свойства, определяющие реакционную способность топлива (пористость и удельная поверхность) в зависимости от температуры процесса.

При ориентации на мало- и среднемасштабную энергетику (диапазон мощностей с опорой на материалы Энергетической стратегии России до 2030 г.: малые локальные энергоустановки, промышленно-отопительные ТЭЦ) температурный уровень в реакторе желательно ограничить средними значениями, лежащими ниже температуры шлакования ($t < 1100\text{-}1200°C$), что требует взамен высокотемпературных агрегатов типа Shell, MHI и др. разработки иного, отвечающего этим требованиям, варианта. В качестве такого газификатора предлагается использовать многозонный поточный или слоевой агрегат, позволяющий получить при умеренных температурах бессмольный газ, близкий к идеальному паровоздушному, и (попутно) активированный полукокс.

Основным недостатком однозонных реакторов является экстремальный профиль температур по их длине. В случае полной газификации это с необходимостью понуждает на переход к жидкому шлакоудалению. При работе в режиме карбонизации оплавление минеральных включений в топливных частицах при их случайном сближении может провоцировать развитие когезионных процессов, выпадение агломератов и шлакование ограждающих поверхностей.

Выравнивание профиля температур осуществляется известными физическими (рециркуляция механического недожега (уноса) и возврат части теплоты выводимых из реактора продуктов) и химическими (распределенный зональный ввод реагентов) приемами.

Рассмотрим работу адиабатного реактора с зональным подводом окислителя и топлива, продуцирующий при умеренных температурах ($<1100\text{-}1200°C$) «бессмольный» топливный газ, близкий по составу к идеальному паровоздушному (CO_2, H_2O, $CH_4 \approx 0$), и полукокс, подвергнутый пароуглекислотной активации (рис.1). Под «бессмольным» будем понимать топливный газ, концентрация конденсирующихся смолистых веществ в котором, проскакивающих в камеру сгорания двигателя, лежит в границах соответствующих ТУ.

В головной части за счет первичного дутья α_1 на основе окисления части летучих осуществляется стадия нагрева и пиролиза загружаемого свежего топлива. В средней части под воздействием вторичного дутья α_2 происходит полное дожигание летучих. В хвостовой части протекает частичная газификация (активация) полукокса газообразными продуктами, поступающими из средней части. Для поддержания автотермичности процесса в эту зону подается третичное дутье α_3.

Позонная отработка предлагаемой технологии проведена в лабораторных (диаметр 150 мм) реакторах и опытно-промышленной установке мощностью 200 кВт. Работоспособность всей схемы проверена на однокорпусной опытной установке тепловой мощностью 15 кВт.

Полученные данные положены в основу разработки пиролизера-карбонизатора для угольной ПГУ сбросного типа с топпинг-процессом (рис.2), оснащенной по предложению УралОРГРЭС секцией высокотемпературного нагрева воздуха в

котле с парогенерирующей секцией в хвостовой части (НПВГ) [4].

Регенерация теплоты выхлопа газовой турбины в НПВГ повышает его производительность и увеличивает тепловую нагрузку на газовую турбину. При оптимальном сочетании параметров паровой поток a_2 может быть снижен до уровня, эквивалентного парогенерации в котле-утилизаторе газовой турбины.

Исходной базой для разработки технологии явился успешный опыт создания технологии и аппаратов для предварительной термической подготовки угольной пыли непосредственно перед вводом ее в топку, приобретенный специалистами УралОРГРЭС в 80-е годы XX века, при работе на котле с ЖШУ (кузнецкий уголь СС) производительностью по пару 420 т/ч, где в каждой из 12 вихревых горелок были вмонтированы узлы подогрева угольной пыли до 650-800°С.

Энергетическая эффективность сбросной технологии с топпинг-процессом существенно зависит от выбора способа термохимической подготовки топлива, который может быть охарактеризован двумя показателями – качественным (полнота термохимической конверсии) и количественным (доля топлива, подвергаемого термохимической конверсии).

Расчет ПГУ по изображенной на рис. 2 схеме произведен для Челябинского бурого угля при следующих параметрах: температура воздуха за воздухонагревателем – 1000°С, температура в камере сгорания газовой турбины – не более 1500°С. Результаты расчета представленные на рис.3, изложены в [5].

Доля топлива j_1, подвергаемая термохимической конверсии в реакторах, может изменяться от 0 до 1. Полнота конверсии, зависящая от способа (пиролиз, карбонизация, газификация), будет варьировать от a_1^0=0,2-0,3 до 0,8.

В проведенном исследовании полнота ТХК задается в двух вариантах:

окислительный пиролиз подаваемого в узел ТХК топлива j_1;

полная газификация (ГФ) топлива j_1.

Кривая а-б-в соответствует процессу пиролиза с a_1^0=0,28. В точке а (j_1=0) и топливо в пиролизер еще не подается. В этом режиме процесс проходит по схеме ПГУ с высоконапорным парогенератором с параметрами: Т=1000ºС, c_1^0=0,7. За счет этого КПД нетто достигает 48%.

В точке б j_1=1 и процесс начинает протекать по схеме скарбонизатором и высоконапорным парогенератором с T_1=1200°С и КПД нетто 53%. Путем уменьшения расхода воздуха режим позволяет поднимать температуру на входе в газовую турбину до 1500°С (точка в), что с учетом отмеченной выше специфики паро-газораспределения в НПВГ позволяет повысить КПД нетто до 55%.

Кривая а-е описывает режимы ПГУ с полной газификацией в узле ТХК и холодной газоочисткой (a_1^0~0,8). Характерно, что с ростом j_1 от 0 до 1 кривая проходит через максимум в точке г, соответствующей j_1=0,6. Падение эффективности ПГУ при больших значениях j_1 вызвано тем, что с дальнейшим уменьшением потока топлива j_2 (в пределе до нуля) НПВГ перестает нагревать компримированный воздух и переходит в режим работы обычного котла-утилизатора за газовой турбиной. В точке е (j_1=1) термический режим соответствует режиму ПГУ-IGCC с температурой T_1=1500°С, выполненной по параллельной схеме с газификатором и холодной газоочисткой.

При сохранении параллельной схемы работы во всем диапазоне j_1=0-1 кривые а-б-в и а-г-е транс-формируются в кривые д-ж и д-е. Столь значительное понижение эффективности является следствием замены регенерации теплоты выхлопа газовой турбины на утилизацию ее в паротурбинном цикле с подключением котла-утилизатора.

Расчетные параметры работы угольной ПГУ с ТХК и воздухонагревателем даны в табл. 1.

Таблица 1. Расчетные параметры работы ПГУ с ТХК и воздухонагревателем

Кривая (точка)	Тип конверсии или тип ПГУ	Полнота конверсии	КПД нетто, %
а-б-в	пиролиз	0.28	48-55
а-г-е	газификация	0.8-0.87	48-53
д-ж	пиролиз	0.28	40-48
д-е	газификация	0.8-0.87	40-50
а	ПГУ с высоконапорным парогенератором КСД и горячей очисткой газа	0	48
б (в)	ПГУ с карбонизатором и высоконапорным парогенератором	0.28	53 (55)
е	ПГУ-IGCC газификатором и холодной газоочисткой	0.8-0.87	50

Анализ относительно простых мероприятий по повышению термической эффективности угольных ПГУ позволяет утверждать о перспективности и конкурентоспособности угольных технологий с газоиспользующим энергооборудованием и о возможности создания в ближайшей перспективе угольной ПГУ с опорой на современную отечественную энергомашиностроительную базу.

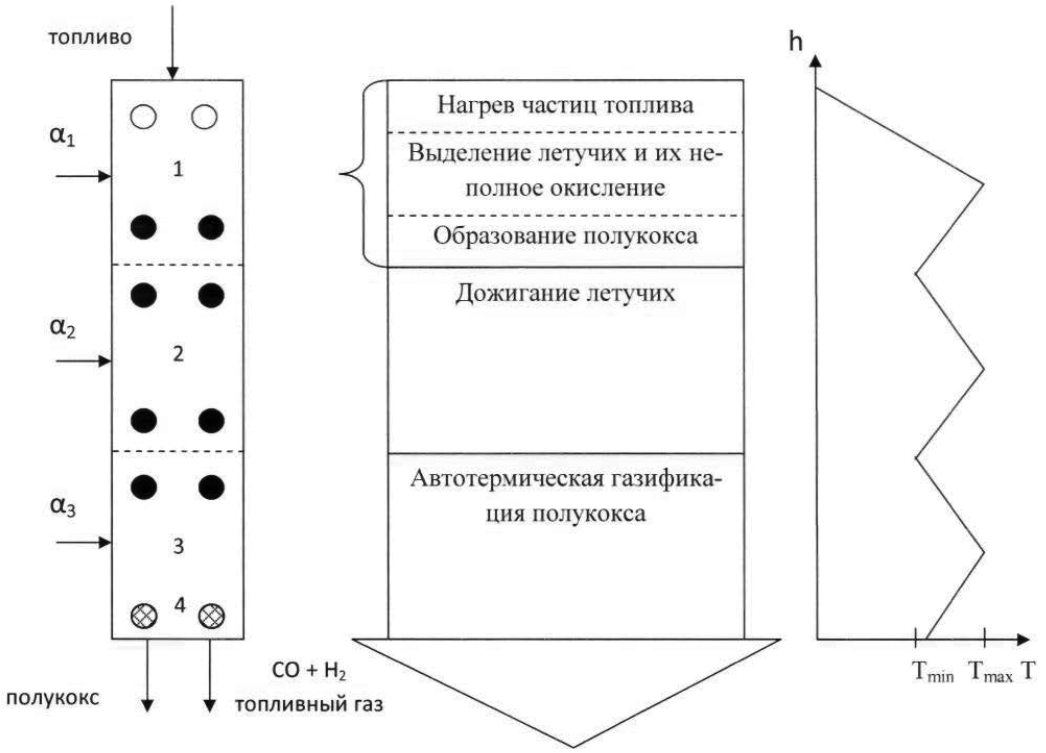

Рис.1 Принципиальная схема процесса: T_{min}, T_{max} – пределы изменения температурного профиля по высоте слоя

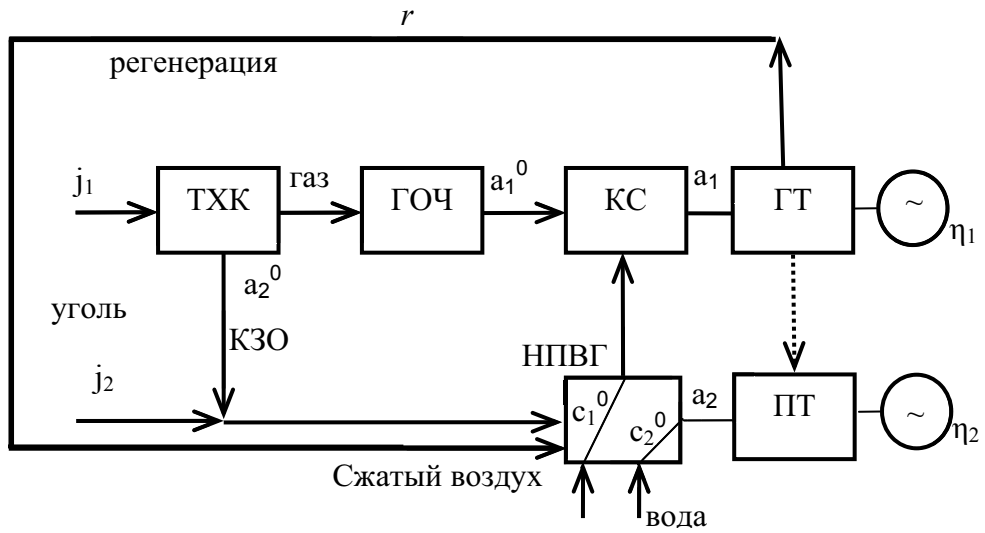

Рис.2 Расчетная схема угольной ПГУ с термохимической конверсией и воздухонагревателем: КЗО – коксозольный остаток, ГОЧ – газоочистка, КС – камера сгорания, ГТ – газовая турбина, НПВГ – воздушный котел с парогенерирующей секцией, ПТ – паровая турбина

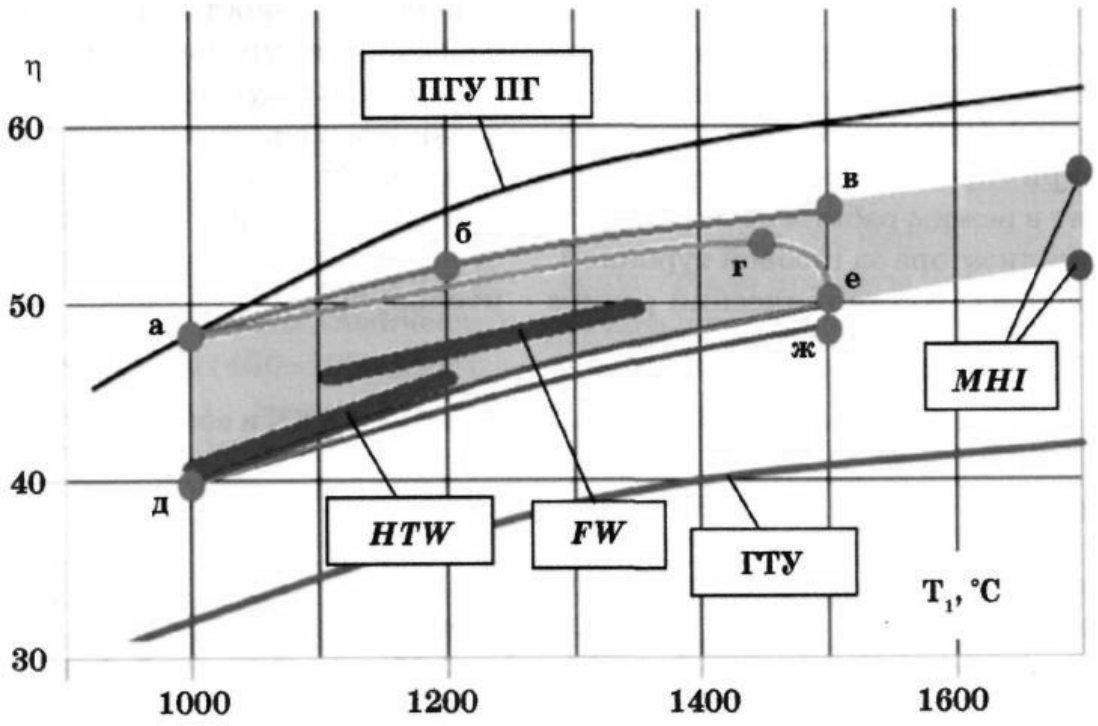

Рис.3 Расчетный КПД угольной ПГУ с воздухонагревателем (в режимах по табл.1) в сравнении с эффективностью других перспективных ПГУ с воздушными реакторами: HTW с газогенератором Винклера с высокотемпературным кипящим слоем, FW – с карбонизатором КС и топпинг-процессом компании Foster Wheeler, MHI с поточным газогенератором компании Mitsubishi, ГТУ – газовая турбина, ПГУ ПГ – ПГУ на природном газе

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена технология внутрицикловой карбонизации угольной пыли, предназначенная для ПГУ. Технология характеризуется относительно низкой температурой проведения основного процесса (900-1000ºС), обеспечивающей высокую степень дегазации, повышенными экологическими характеристиками сжигания газа (выброс оксидов азота находится на уровне выбросов за котлами на природном газе при избытке воздуха 1.05-1.06), низкой удельной стоимостью реализации, особенно при ее внедрении на существующих угольных предприятиях с уже имеющейся инфраструктурой.

Разработана технология внутрицикловой газификации низкосортных топлив в топливный газ для газовых двигателей (ГТУ, ДВС) и топливных элементов. Технология характеризуется низким содержанием смол и углеводородов в газе и высоким химическим КПД (80% – достигнутый, 90-95% – расчетный), что позволяет в перспективе повысит электрический КПД малых ТЭС на биотопливах до 30-33%, с использованием топливных элементов – до 50%, буроугольных ГТУ-ТЭЦ и ПГУ-IGCC – до 50-55%, придав им реальную конкурентоспособность.

В основу механизма повышения химического КПД и качества синтез-газа заложен принцип многостадийной конверсии и химической регенерации, осуществляемой за счет глубокой интеграции по теплу топливоприготовительной (конверсия, газоподготовка) и топливоиспользующей (ПГУ, топливный элемент, завод СЖТ) частей комплекса. Полезное использование теплоты газа из системы газоочистки является первым («внутренним») контуром регенерации теплоты, повышающим общую эффективность газовырабатывающего комплекса. Второй («внешний») контур возвращает в установку по производству газа вторичную теплоту, образовавшуюся в газопотребителе (теплота уходящих газов за ГТУ, ДВС, тепловые сбросы химических заводов. Такая двойная регенерация теплоты может быть достигнута глубокой интеграцией газопроизводящего и газопотребляющего комплексов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыжков А.Ф., Попов А.В., Силин В.Е., Богатова Т.Ф. Эффективность инновационных решений для угольной энергетики // Энергетик. 2010. №5. С. 2-7.
2. Рыжков А.Ф., Попов А.В., Богатова Т.Ф., Силин В.Е. Тепловые режимы термохимической конверсии низкосортных топлив в энергетических установках // Труды 5 Российской национальной конференции по теплообмену. Т. 3. М.: Изд-во МЭИ, 2010.
3. Ryzhkov A.F, Bogatova T.F., Popov A.V. and Usova G.I. The Effect of Thermal Pretreatment Process on Bio-Fuel Conversion (ch. №1 in «Biofuel's Engineering Process Technology»). Croatia : InTech, 2011. P.3-23.
4. Шульман В.Л., Зайцев А.В., Богатова Т.Ф. Развитие угольных парогазовых технологий // Технологии эффективного и экологически чистого использования угля: доклады международной научно-практической конференции. М.: ОАО «ВТИ», 2009. С. 246-251.
5. Богатова Т.Ф., Попов А.В., Рыжков А.Ф., Силин В.Е. Парогазовые технологии на угле. Глава 4 в монографии « Инновационные технологии в энергетике» // под общ.ред. Н.В. Клочковой. Иваново: «Научная мысль», 2011. 288 с.