

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

УДК 662.65

А.Р. БОГОМОЛОВ, с.н.с, д-р техн. наук
(ИТ СО РАН, г. Новосибирск)

Е.Ю. ТЕМНИКОВА, доцент, канд. техн. наук
(КузГТУ, г. Кемерово)

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ УГОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Совсем недавно, распоряжением от 18 июня 2012 г. № 512-р Коллегии Администрации Кемеровской области утверждена Программа развития углехимического кластера Кемеровской области на период 2012-2020 гг. [1]. Под кластером понимается группа географически соседствующих взаимосвязанных компаний и связанных с ними организаций, действующих в определенной сфере, характеризующихся общностью деятельности и взаимодополняющих друг друга. Углехимический кластер включает группы взаимосвязанных компаний: специализированные поставщики – действующие предприятия угледобычи и первичного обогащения; поставщики оборудования и сервисные компании; образовательный комплекс, включая КузГТУ; научный комплекс; инновационно-внедренческая инфраструктура.

Программа развития кластера взаимосвязана со Стратегией социально-экономического развития Кемеровской области и планами территориального развития муниципальных образований. Составной частью специализации углехимического кластера Кемеровской области – производство продукции с использованием новейших технологий переработки отходов угольного производства.

Для Кемеровской области вследствие топливного ресурсного потенциала угледобывающая отрасль остается на долгосрочный период доминирующим сектором экономики. Для Кузбасса 192 млн. тонн добытого угля в 2011 году является значительным объемом угледобычи. Эта отрасль является и основой для решения задач социально-экономического развития региона. Основной задачей дальнейшего развития отрасли является грамотное и эффективное управление этим ресурсом.

Экстенсивное развитие отрасли по ряду объективных ограничений является затруднительным. Одной из таких причин является географическая удаленность области от основных рынков сбыта – более 5 тыс. км по железной дороге от дальневосточных портов и портов на

Балтике и в г. Мурманске. Вследствие этого высокие затраты на транспорт являются одним из основных факторов снижения конкурентоспособности угля в теплоэнергетике и экспорте. Кроме того, на внешнем рынке происходит увеличение поставок угля из Австралии и Индонезии. На внутреннем же рынке спрос на уголь снижается в силу высокой конкуренции с природным газом, так как газ пока еще остается дешевым и экологически чистым видом топлива. За последние годы происходит ухудшение условий разработки угольных месторождений – рост глубины разработки пластов подземным способом и в 1,5 раза возрос коэффициент вскрыши на разрезах. Наиболее важной причиной ограничения наращивания добычи угля до 200 млн тонн в год остается экологическая проблема. Необходимо выполнение комплекса защитных экологических мер.

В номенклатуре продукции углехимического кластера представлены такие направления, как электрическая и тепловая энергия, полученная с применением технологий: сжигания угля в циркуляционном кипящем слое; на сверхкритических параметрах пара; с использованием суспензионного водоугольного топлива (ВУТ); на распределенных объектах малой генерации. Другими видами продукции углехимического кластера являются продукты от переработки отходов: утилизации промстоков, осадков ГОС и угольных; брикеты из угольных шламов.

В данной работе будут рассмотрены инновационные технологии генерации тепла и электроэнергии при использовании отходов угольной отрасли, что находится в контексте номенклатуры продукции углехимического кластера. Ранее и в настоящее время отходы угледобычи и углеобогащения, к ним можно отнести угольные шламы с зольностью 45%, КЕК с зольностью в основном до 30% и практически не востребованный на рынке окисленный уголь до 35% зольности, складироваться в отвал. Таким образом, наносится трудно поправимый экологический ущерб территории Кузбасса в первую очередь, и во вторую – добытый тяжелым и опасным трудом уголь вновь укладывается в землю.

Для проведения комплекса защитных экологических мер следует отметить следующее: необходимо использовать перечисленные отходы с высокой эффективностью, чтобы каждый процент углеродсодержащего топлива был использован для производства продукции, в частности, тепла и электроэнергии. Будущий год и последующие для Кузбасса должны стать временем изменения технологической платформы, созданием полигона для внедрения инновационных технологий переработки отходов с целью генерации энергии и выпуска продукции. Главной причиной отсутствия таких технологий сегодня – это большие затраты на доведение отходов до кондиционного состояния, необходимого заданной технологии, главным образом, имеющих высокую, до 40%, влажность. В связи с этим,

предлагается привлечь административный ресурс, либо свободную волю собственника, а именно, заинтересовать угольные компании не складировать отходы в отвал, не продавать отходы компаниям, занимающихся их переработкой, например, брикетированием, а производить плату в размере, равной затратам на утилизацию или складирование в отвал.

У угольных компаний должен быть лозунг или кредо, чем больше угля обогащается, тем меньше отходов складировается в отвал.

В рамках Международного Кузбасского угольного форума 21 сентября этого года в Кузбасской торгово-промышленной палате, прошла научно-практическая конференция «Инновационные технологии использования угля в энергетике», организованная совместно с Администрацией Кемеровской области, ОАО «Кузбасский технопарк» и Кузбасским государственным техническим университетом имени Т.Ф. Горбачева. Следует остановиться на некоторых, наиболее интересных и, пожалуй, перспективных технологиях генерации энергии.

А. Одна из рассматриваемых технологий направлена на использование механоактивированных углей микропомола для розжига и стабилизации горения пылеугольных котлов взамен газа или достаточно дорогого мазута [2, 3]. Другой путь в приближении конкурентоспособности угля к природному газу является повышение его качества на основе новых научных разработок и технологических решений, в том числе глубокой деминерализации топлива и повышения реакционной способности посредством активационного измельчения [4].

Проблема использования мазута вытекает из следующих соображений. Для хранения привозимого железнодорожным транспортом

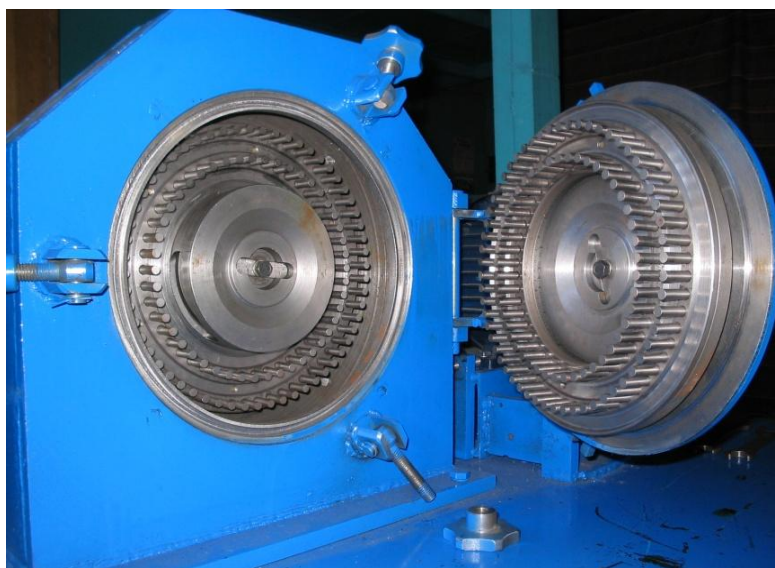


Рис. 1 – Мельница-дезинтегратор
производительностью 150 кг/ч [3]

в цистернах мазута используют специальные хранилища, а

мазутопроводы необходимо

поддерживать в горячем состоянии. Для розжига

пылеугольных котлов вместо мазута можно

использовать уголь, который применяется в

качестве основного топлива. Метод основан

на получении механоактивированного

угля микропомола с

высокорекрационными свойствами при помощи мельниц-дезинтеграторов и подачи его в часть горелок котла во время розжига. Применение угля микропомола позволяет получить экономию при отказе от мазута, сокращение вредных выбросов в атмосферу, автоматизацию процесса розжига и стабилизацию горения пылеугольных котлов.

Мельница-дезинтегратор – оборудование для физико-механической обработки, представляет собой помольно-смешивающий (дробильно-помольный) агрегат при вторичном измельчении твердых сыпучих материалов различного происхождения методом высокоскоростного свободного удара, изображенного на рисунке 1. Сущность механического активирования, как излагают авторы [4], состоит в создании некомпенсированных связей, радикалов, подвижных активных центров и определенной ориентации деструкционных молекул угольного вещества. Наряду с увеличением поверхностной энергии это вносит свой вклад в изменение энергии активации. Авторами [4] установлено, что в результате активационного измельчения энергия активации с 200 кДж/моль уменьшается до 60 кДж/моль. Снижение энергии активации повышает реакционную способность топлива.

При активационном измельчении значительно возрастает количество частиц и поверхность реагирования, интенсивность теплообмена, которая обратно пропорциональна размеру частиц. При горении в диффузионном режиме, характерном для факельного сжигания в пылеугольных топках, реализуется практически 3-х кратное ускорение процесса сжигания. Таким образом, пылеугольный факел по своим размерам, теплонапряженности и интенсивности выгорания приближается к газовому или мазутному. Технология разработана профессором Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН Анатолием Петровичем Бурдуковым.

Мировая энергетическая практика показывает, что достаточно успешно реализуются направления использования угля микропомола как замещение мазута в промышленных котлах, так и замена слоевого сжигания на факел с углем микропомола. Зарубежные данные из доступных источников выявили некоторые преимущества котла при работе на угле микропомола по сравнению со слоевым сжиганием угля: а) 15% снижение эксплуатационных расходов; б) за счет снижения избытка воздуха с 1,35 до 1,15 выше тепловая эффективность установки из-за уменьшения выбрасываемого с уходящими газами тепла; в) топки с цепной решеткой требуют использования определенного фракционного состава углей для уменьшения провала через решетку и уноса; г) при использовании угля микропомола в газомазутных котлах увеличивается на 20% его время непрерывной работы; д) снижение выбросов NO_x на 25% по сравнению со слоевым сжиганием. Испытания, проведенные на котле

мощностью 600 МВт, показали, что система работает удовлетворительно и срок окупаемости менее 4-х лет [4].

В настоящее время данная технология внедряется компанией Р.В.С. совместно с Институтом теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН на Беловской ГРЭС ОАО «Кузбассэнерго». На Беловской ГРЭС установлено шесть энергоблоков. Котел П-образной компоновки ПК-40-1 прямоточный, двухкорпусной, с жидким шлакоудалением предназначен для сжигания каменных углей Кузнецкого месторождения марок Г, Д и промпродукта их обогащения. На каждом корпусе котлоагрегата установлена индивидуальная система пылеприготовления с промежуточным бункером пыли.

Б. Другая проблема в угольной отрасли заключается в том, что в ней на разных этапах добычи и переработки углей образуются большие объемы сильно обводненных угольных шламов и кека, которые не могут быть востребованы при существующих методах сжигания углей. В процессе мокрого обогащения углей также образуются в больших объемах отходы, которые, как правило, выбрасываются в окружающее пространство, загрязняя его, при том, что эти отходы порой содержат более 50 % углерода. Эффективным выходом из создавшегося положения может оказаться перевод котлов на сжигание углей в виде водоугольного топлива (ВУТ), которое называют иногда «жидкий уголь» [5-8].

ВУТ представляет собой однородную суспензию из угля мелкого помола и воды в примерном соотношении 2:1, а также небольшого количества пластификатора, используемого для изменения определенных характеристик суспензии (текучести, стабильности и т.д.). Достоинств у этого вида топлива много: оно не взрывоопасно, его можно транспортировать по трубопроводам на дальние расстояния, при этом затраты на хранение невелики. Относительно дешевое как топливо, ВУТ может частично или полностью заменить дорогостоящий мазут. Но главное, что степень выгорания горючей массы «жидкого угля» достигает 95–99%, а это чуть ли не вдвое больше, чем при обычном сжигании сухого угля. При этом КПД котлов возрастает до 80–85% по сравнению с характерными, например, слоевыми котлами, 40–50%. Кроме того, при сжигании ВУТ значительно снижаются вредные выбросы оксидов азота, угарного газа и частиц летучей золы.

В форме исторической справки можно отметить следующее. Технология сжигания угля в виде водоугольного топлива теоретически известна давно. Исследования по проблемам производства ВУТ из различных углей, его хранения, транспортировки и сжигания ведутся, начиная с 60-х годов прошлого столетия. Параллельно с теоретическими разработками использования ВУТ в котлах велись его испытания на опытных производствах. Этим занимались как известные отечественные

научные школы (среди них – Институт горючих ископаемых, ВНИИПИ «Гидротрубопровод», Энергетический институт им. Кржижановского), так и научные коллективы в США, Канаде, Италии. И все же широкого тиражирования в мире технология ВУТ не получила. В последние годы о ней вновь заговорили. В 2007 г. в Конгрессе США прошли слушания по вопросу применения «жидкого угля» в качестве одного из базовых энергоносителей в национальной энергетической программе.

В СССР и России технологию ВУТ пытались внедрить на объектах большой энергетики. Так, ВУТ, произведенное из кузнецкого угля, транспортировали из г. Белово по трубопроводу длиной 262 км до Новосибирской ТЭЦ-5. Вопросами получения композитного жидкого топлива из низкорекреационных углей, торфа и отходов нефтепереработки занимались сотрудники НГТУ и «Новосибирскэнерго», а на НПО «Гидротрубопровод» была разработана технология экологически чистого топлива «ЭКОВУТ». Однако, испытания технологии ВУТ в большой энергетике принесли негативный результат. Производство «жидкого угля» оказалось слишком сложным и затратным, и важно то, что фракционный состав и характеристики конечного продукта были нестабильны. Ресурс работы сопел форсунок не превышал 40 ч, а недожог топлива составлял более 15%.

Проведенные испытания обозначили основные задачи: первая – разработка эффективного метода измельчения угля для получения высокорекреационной стабильной пластичной массы с минимальным содержанием воды; вторая – разработка эффективных конструкций топочных устройств и всего сопутствующего оборудования. В Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН и заводе стеновых блоков г. Новосибирска разработали и реализовали в опытно-промышленном варианте все основные компоненты технологии подготовки, хранения и сжигания ВУТ, пригодной для нужд малой энергетики.

Для помола угля используют шаровую барабанную мельницу, позволяющую получать 10 т водоугольной суспензии в час с дисперсностью частиц около 100 мкм. Затем суспензию направляют в роторный генератор пузырьковой кавитации. В процессе кавитации в жидкости образуются ударные волны, высокие давления и высокие температуры. Частицы угля эффективно разрушаются и измельчаются до 50–60 мкм. Таким образом, сначала уголь измельчают на шаровой мельнице и затем смешивают с водой. Благодаря добавлению специально подобранных пластификаторов, получают пластичное водоугольное топливо с концентрацией угля порядка 60-70%. ВУТ может сохранять свои свойства и не расслаиваться в течение месяца. Активируют топливо, пропуская его через роторный генератор уже непосредственно перед сжиганием.

Сотрудники Института теплофизики разработали принципиально новые топочные устройства с оригинальной формой камеры горения и размещением в ней пневматических топливных форсунок, что позволило организовать вихревой воздушно-капельный поток. В результате факел заполняет весь объем камеры, и температурное поле в топке становится однородным. Опыт сжигания в таких топочных устройствах разных топлив показал, что оптимальный диапазон температур горения ВУТ – 800–950°С. Именно в этом температурном интервале при сжигании образуется наименьшее количество загрязняющих веществ.

Важным этапом в проектировании технологии сжигания ВУТ является разработка форсунки для подачи топлива. ВУТ – высокоэрозионный продукт. Благодаря оригинальной конструкции форсунки взаимодействие газовой и топливной струй происходит за пределами самого устройства, и абразивного разрушения материала не происходит. На рисунке 2 показана разработанная для сжигания ВУТ форсунка.

Работа форсунок основана на использовании свойств пристенных и кумулятивных струй и эффекта Коанда. Благодаря особой конструкции, форсунки износоустойчивы и имеют длительный ресурс успешной работы (до 1000 ч), так как взаимодействие газовой и топливной струй происходит за пределами самого устройства.

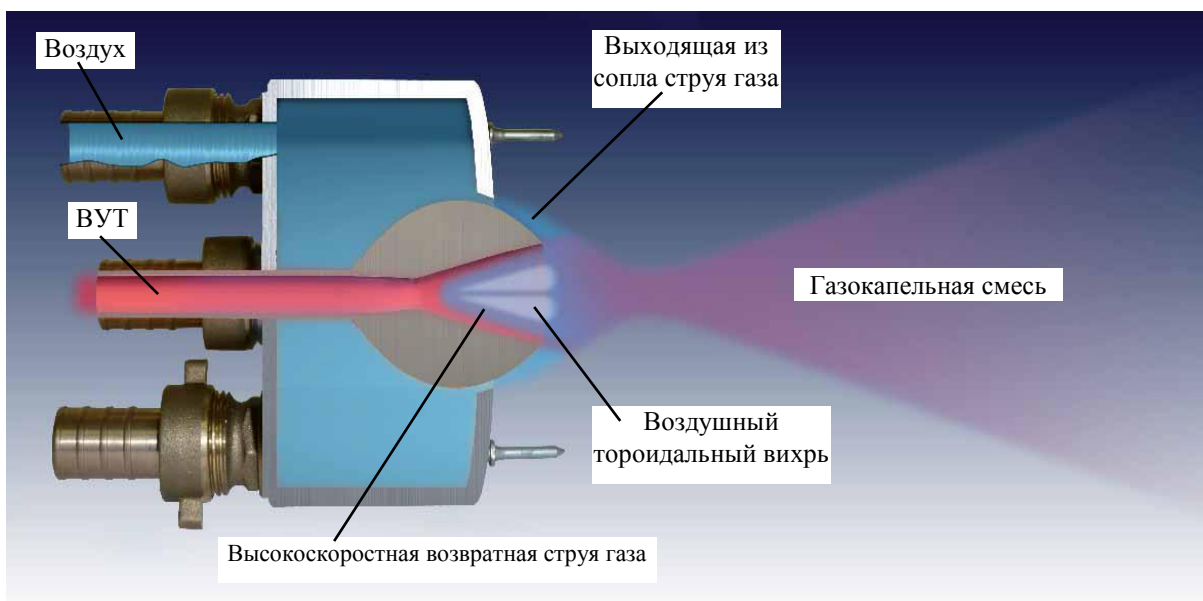


Рис. 2 – Принципиальная схема работы форсунки [7]

Технология сжигания угля в виде ВУТ по сравнению с традиционными способами сжигания угля имеет целый ряд преимуществ: а) это увеличение степени выгорания горючей массы до 95–99%; б) увеличение КПД котлов до 80–85%; снижение себестоимости единицы вырабатываемой тепловой энергии в 1,5–5 раз, в зависимости от

соотношения цен на уголь и другие энергоносители; в) возможность частичной или полной замены дорогостоящего мазута и других углеводородных топлив; г) возможность использования угольных шламов и отходов углеобогащения; д) взрывопожаробезопасность; е) возможность транспортировать ВУТ по трубопроводам, в том числе, на дальние расстояния; ж) уменьшение эксплуатационных затрат при хранении, транспортировании и сжигании ВУТ по сравнению с углем; з) частичное решение экологических проблем – снижение вредных выбросов (окислов азота, окиси углерода, частиц летучей золы).

При существующих обстоятельствах наиболее перспективной для применения водоугольных технологий является малая энергетика, так как здесь меньше капитальные затраты на реконструкцию котлов, невысокие сроки окупаемости.

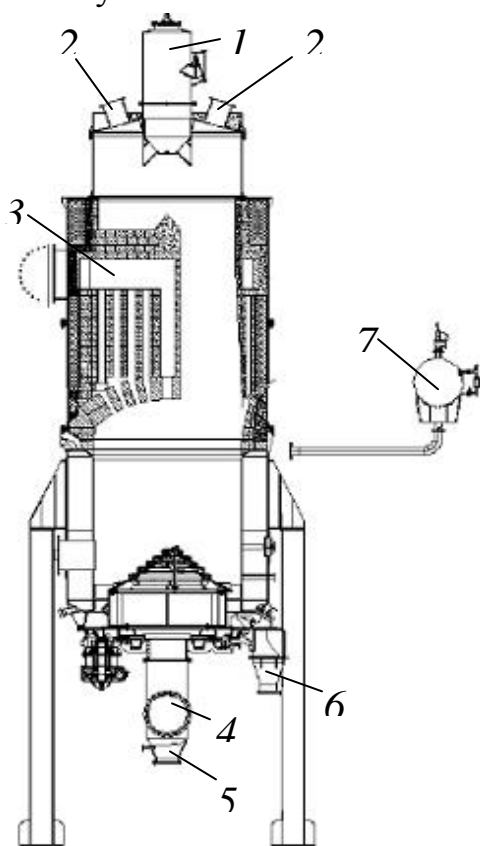


Рис. 3 – Схема газогенератора с двойным отбором газа:

1 – загрузка топлива; 2 – отвод верхнего (пиролизного) газа; 3 – отвод нижнего (генераторного) газа; 4, 5 – подвод пара и воздуха на дутье; 6 – выгрузка золы; 7 – паросборник

В. Не менее значимая и привлекающая к себе внимание является инновационная технология переработки угольных отходов для генерации тепловой и электрической энергии с использованием газогенераторов прямого процесса с двойной зоной горения (двойным отбором газа).

Внедрение газификационных технологий, основанных на использовании небольших и простых в эксплуатации газогенераторов и работающих на местных видах топлива или на отходах угледобычи, становится в настоящее время всё более актуальным. Так, например, выработка электрической и тепловой энергии для покрытия собственных нужд предприятия может быть целесообразной, по крайней мере, двум причинам: а) неуклонный рост цен в стране на углеводородное энергетическое топливо вызывает рост тарифов на электрическую и тепловую энергию; б) значительно отстающий от роста промышленности ввод новых энергетических мощностей [9]. На рисунке 3 показан газогенератор с двойным отбором газа.

Основной особенностью двухзонных реакторов (газогенераторов) является разделение реактора на зоны подготовки топлива (зона пиролиза) и газификации. Так как реактор полностью заполняется газифицируемым топливом, система уплотнений нижней части газогенератора должна обеспечивать соответствующее давление газов в нижней части реактора.

По мощности в зависимости от состава газифицируемого топлива газогенераторы с двойным отбором газа и диаметром реактора 3000 мм могут достигать 17-18 Гкал/ч (по суммарной теплоте сгорания вырабатываемого газа). При этом низшая теплота сгорания генераторного газа, которая, прежде всего, зависит от состава газифицируемого топлива, в целом, составляет от 1300 ккал/м³ до 1700 ккал/м³.

При сравнении двух типов газогенераторов прямого процесса, классического с верхним отбором газа и с двойным отбором с одинаковым 3-х метровым реактором можно отметить, что:

- производительность газогенератора с двойным отбором по газу выше примерно на 40–43% (11400 против 7000 нм³/ч);
- теплота сгорания газа выше на 30–35% (до 1700 против 1250 ккал/нм³);
- тепловая мощность по газу выше примерно в 2 раза.

Основными отличиями газогенератора с двойным отбором газа, влияющими на его производительность являются:

- разделение газогенератора на зоны подготовки топлива и его газификации с двумя отборами газа – газификации подвергается топливо постоянной влажности;
- повышенное давление газификации за счет сухого золоудаления и отказа от чаши гидрозатвора – возможность ведения процесса при повышенном давлении и при более высоком слое топлива;
- использование теплоизоляционного и огнеупорного материала для внутренних газоходов и как следствие возможность ведения процесса при максимально высоких температурах, которые могут позволить плавкостные и шлакующие характеристики газифицируемого топлива;
- возможность утилизации генераторной смолы и фусов в газогенераторе.

Выбору топлива для газификации всегда уделялось немаловажное значение. В реактор подается топливо уже усредненного состава по влажности и содержанию летучих веществ. Работа газогенератора в этих условиях становится более стабильной.

При газификации топлив с малым содержанием летучих, на первый план выходит вопрос температуры уходящего генераторного газа. В конструкции газогенераторов приходится применять жаропрочные стали или предусматривать их термозащиту. Велики потери физического тепла газа. В

газогенераторе данного типа горячий генераторный газ движется вверх по вертикальным каналам из огнеупорного материала, охлаждаемым подающимся сырым углем. Таким образом, физическое тепло генераторного газа используется для сушки топлива и возгонки летучих веществ.

Следующим фактором, определяющим повышенную производительность газогенератора с двойным отбором газа, является повышенное давление газификации, определяемое большим расходом воздушного дутья относительно равномерно распределенной по сечению колосниковой решетки. Так как, сопротивление слоя топлива растет пропорционально квадрату скорости газовой смеси в нём, то эта величина определялась сопротивлением гидрозатвора, применяемого на классических газогенераторах прямого процесса, который и являлся лимитирующим фактором в производительности агрегата. Кроме того, на сопротивления слоя топлива оказывает влияние его фракционный состав. В этом смысле использование брикетов с заранее заданными геометрическими размерами позволяет прогнозировано уменьшить сопротивление слоя.

Кроме того, при высоте гидрозатвора более 500 мм применяют ковшовые элеваторы, что усложняет установку и увеличивает трудозатраты. Отказ от гидрозатворов и переход на систему сухих уплотнений позволяет не ограничивать давление под колосниковой решеткой. При этом усложняется система подачи топлива в газогенератор и вывод шлака – применяется шлюзование. Высокий слой топлива генерирует газ более высокой теплотворной способности.

Авторами [9] был произведен расчет эксплуатационных характеристик ТЭЦ установленной электрической мощностью $N_{эл}=16$ МВт и суммарной тепловой мощностью $N_{тепл}=50$ Гкал/ч, работающей на брикетах. Брикетты имеют низшую теплоту сгорания до 4200 ккал/кг и состоят из 2-х частей окисленного угля и 1-ой части смеси кека и шлама. Влажность брикета 14–18%, а зольность на уровне 20%.

Если принять, что целью строительства ТЭЦ в равной степени является выработка электричества и тепловой энергии, то удельная инвестиционная стоимость одного установленного кВт составит примерно – 520 долларов США и одной установленной Гкал – 170 тыс. долларов США (или 0,117 долларов за 1 установленную ккал тепловой энергии).

Низкая себестоимость вырабатываемой электроэнергии, составляющая 0,84 рубля за 1 кВт·ч и тепловой энергии – 223,5 руб. за 1 Гкал, позволяет окупить затраты на реализацию строительства когенерационной электростанции менее, чем за три года. Следует отметить, что низкая себестоимость производимой энергии в первую очередь определяется тем, что в качестве топлива используются отходы угледобычи.

Следует отметить, что в данном расчёте было принято значение КПД

газификации равным 85%, что в какой-то мере должно соответствовать реальному значению КПД газификации. Расчеты показывают, что при максимальной утилизации физического тепла нижнего газа, с возвратом большей части тепла в реактор с дутьем (с горячим воздухом и перегретым паром) и сжигании верхнего газа в топке котла, КПД газификации должно составить примерно 90%.

Г. Одним из перспективных направлений использования высокозольных углей, шламов, кека и биомассы является низкотемпературная вихревая (НТВ) технология. Эта технология, сохраняя принципы традиционного пылеугольного сжигания, за счет более эффективной аэродинамики топочного процесса позволяет снизить шлакование топочных и конвективных поверхностей нагрева энергетических паровых котлов. Многолетний опыт промышленной проверки НТВ технологии сжигания ряда топлив позволил выявить преимущества указанной технологии по сравнению с традиционными пылеугольными топками [10].

Сотрудниками Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева (КузГТУ) по программе «Энергосбережение СО РАН» была разработана и изготовлена новая конструкция гравитационно-рециркуляционной вихревой топки (ГРВТ) [11, 12], впоследствии получившая название высокотемпературного циклонного реактора (ВЦР), предназначенного для работы на высокозольном твердом топливе. Установка для исследования горения измельченного твердого топлива в полупромышленном аппарате ВЦР смонтирована на заводе полукоксования г. Ленинск-Кузнецкий. Схема ВЦР и гидродинамические траектории частиц топлива показаны на рисунке 4.

ВЦР представляет собой вертикальный цилиндрический четырехступенчатый аппарат с тангенциальным вводом топливно-воздушной смеси в первую (нижнюю) ступень аппарата через прямоугольные сопла кольцевого канала перемешивания топлива и окислителя. В первой ступени установлены две горелки для разогрева ВЦР в начальном процессе розжига. Третья ступень снабжена тангенциальными регулируемыи прямоугольными каналами подвода вторичного воздуха. Верхняя четвертая ступень аппарата предусмотрена для улавливания мелких частиц золы и транспортирования в бункер.

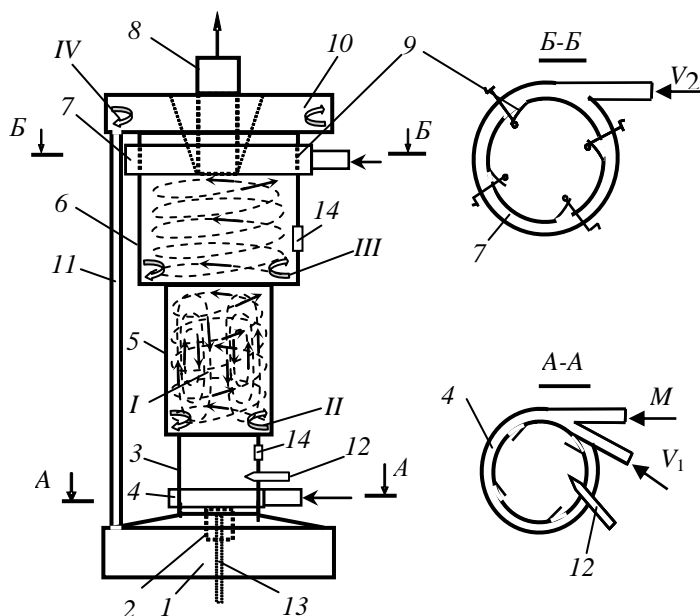


Рис. 4 – Схема ВЦР и траектории частиц топлива в потоке воздуха: *I* – центральная область рециркуляции топлива, *II*, *III*, – тороидальные зоны движения топлива на полках ступеней, *IV* – тороидальная зона движения мелких частиц золы. *1* – бункер для шлака и золы, *2* – труба для отвода шлака, *3* – первая ступень, *4* – канал подвода первичного воздуха и топлива, *5* – вторая ступень, *6* – третья ступень, *7* – канал подвода вторичного воздуха, *8* – выхлопная труба, *9* – заслонки, *10* – четвертая ступень, *11* – каналы отвода золы, *12*, *13* – газовые горелки, *14* – смотровые окна.

перемешивание топлива и окислителя достигается путем организации в реакторе ряда зон рециркуляции топлива в потоке воздуха, основная из которых – центральная образуется в центре второй и третьей ступеней. Продукты сгорания, содержащие мелкие частицы топлива и золы, поступают в верхнюю (четвертую) ступень. Эта ступень кроме камеры догорания выполняет также функции пылеуловителя, в которой остатки топлива сгорают, а зола удаляется в бункер. Продукты сгорания выходят через выхлопную трубу. Тангенциальный подвод вторичного подогретого воздуха в третью ступень реактора исключает образование бедных кислородом областей в верхней ступени реактора и позволяет получить устойчивые области рециркуляции для улучшения стабилизации пламени.

При эффективном режиме горения первая ступень работает как газификатор. Под действием центробежных сил происходит сепарация частиц топлива по размерам и массе, что является преимуществом по сравнению с топками с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС). В реальных условиях измельченное топливо обладает широким фракционным составом и условия горения каждой фракции различны. Это усложняет регулирование процесса горения в отличие от ВЦР. На полках второй ступени происходит горение относительно крупной фракции топлива. Длительное время пребывания и отличное

НТВ технология сжигания твердого топлива предполагает низкие температуры горения в объеме аппарата, чтобы избежать повышенного образования окислов азота в дымовых газах. Оптимальная температура (наименьшая для полного сгорания топлива) в объеме третьей ступени циклонного реактора, предлагаемого КузГТУ, при низкотемпературном режиме работы ВЦР поддерживается на уровне 900°C при избытке воздуха $\alpha = 1,5-2,1$.

В работе [12] представлены опыты по сжиганию измельченного высокозольного угля марки ДГОК ($A^p = 35\%$) при подаче только первичного воздуха (в первую ступень) и при подаче дополнительного, вторичного воздуха в третью ступень реактора. Основные режимные параметры экспериментов сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Температура первичного воздуха, °С	Температура вторичного воздуха °С	Температура дымовых газов °С	Расход топлива кг/ч	Расход первичного воздуха м ³ /ч	Расход вторичного воздуха м ³ /ч	η	Избыток воздуха α
219	–	575	18,5	395	0	0,72	1,5
220	205	560	18,5	266	190	0,83	2,1

С подачей вторичного воздуха при некотором снижении температуры в области третьей ступени, интенсивность горения в реакторе увеличилась, и коэффициент полноты сгорания в ВЦР составил 0,83. Вместе с тем увеличился унос золы с дымовыми газами.

Измерения состава дымовых газов газоанализатором «Автотест» для характерных режимов показали содержание $CO \approx 0,01\%$, $CO_2 = 9-10\%$ и $O_2 = 5-6\%$.

Для установления причины малоэффективной работы реактора была проведена серия аэродинамических опытов, в которых с помощью видеосъемки изучалось движение потоков угольной крошки без горения. Для этого была изготовлена верхняя крышка из прозрачного органического стекла. Было сделано необходимое освещение внутреннего объема аппарата, не изменяющее аэродинамику движения угольных частиц, и произведена видеосъемка. Характерный фотоснимок аэродинамики показан на рисунке 5.

Наблюдения показали, что начальная закрутка ($S = 3,4$) и скорость воздушно угольной смеси недостаточна для подъема крупных угольных частиц, поэтому часть их падает сразу в бункер золы. Кроме того, при подаче только первичного воздуха (в составе воздушно-угольной смеси) часть крупных частиц топлива оседает на полках второй и третьей ступени. При подаче вторичного воздуха в соотношении $V_1/V_2 = 0,4-0,5$ все

топливо циркулирует в области второй и третьей ступени и не осаждается на полках.



Рис. 5 – Фотография движения угольной крошки на «холодной» модели аппарата – высокотемпературного циклонного реактора. Опыты по сжиганию высокозольных топлив и возобновляемых источников энергии (биомассы) будут продолжаться и возможно дальнейшее изменение конструкции аппарата ВЦР. Проводится разработка математической модели ВЦР с целью оптимизации процессов сжигания высокозольного топлива и биомассы и улучшения конструкции аппарата.

Д. Ранее было отмечено, что отходы угледобычи и углеобогащения, особенно высокой зольности, до 50%, которые до настоящего времени, чаще всего, не подвергаются переработке и утилизации, а направляются и складываются в отвал, можно перерабатывать методом газификации. Данный метод применим для любых органических материалов независимо от их физико-химических свойств.

Сотрудники КузГТУ занимаются исследованием закономерностей процесса переработки отходов древесины, угледобычи и углеобогащения в среде перегретого водяного пара с получением высококалорийного газообразного топлива и синтез-газа. Эти исследования направлены на реализацию приоритетного направления развития Российской Федерации в области энергосбережения и энергоэффективности.

Результаты проведенных исследований и выполненное технико-экономическое обоснование рентабельности процесса предоставляют возможные перспективы разработки технологии переработки отходов древесины, угледобычи и углеобогащения в среде перегретого водяного пара с получением высококалорийного газообразного топлива и синтез-газа.

Для исследования процесса газификации был создан экспериментальный стенд, схема которого представлена на рисунке 6.

Была произведена реконструкция первой ступени ВЦР с целью увеличения параметра закрутки ($S = 7,6$) и входной скорости смеси в два раза. Это позволило предотвратить падение несгоревших крупных частиц топлива в бункер на входе в аппарат, что подтвердили визуальные опыты.

Необходимо отметить, что в настоящее время проводятся испытания нового

Характеристика обрабатываемого материала дана в таблице 2.

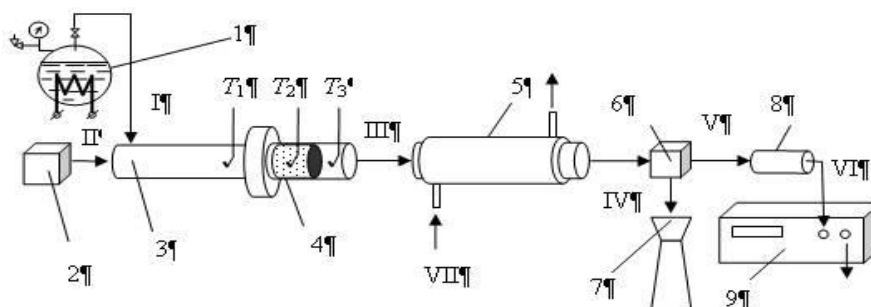


Рис. 6 – Схема экспериментального стенда

I – вход низкотемпературного пара; II – вход высокотемпературного пара; III – выход паро-газовой смеси; IV – выход конденсата; V – выход влажного газа; VI – выход сухого газа; VII – охлаждающая вода

1 – парогенератор; 2 – генератор горючей смеси; 3 - зона смешения рабочего участка;

4 – реакционная зона рабочего участка; 5 – конденсатор; 6 – емкость разделения;

7 – емкость сбора конденсата; 8 – емкость осушения газа; 9 – газоанализатор

T_1, T_2, T_3 – соответственно измерение температуры перед реакционной зоной, в реакционной зоне и после нее

Таблица 2

Образец	Элементный состав, %			Влагосодержание W^a , %	Выход летучих веществ V^d , %	Зольность A , %
	N	C	H			
Шлам ЦОФ «Березовская»	-	83,8	4,84	1,92	30,61	46

Газификация образцов осуществлялась в среде перегретого (до 1200°C) водяного пара без доступа кислорода при давлении, незначительно превышающем атмосферное. Перегретый водяной пар получали смешиванием низкопотенциального пара, получаемого в парогенераторе, и высокотемпературного пара, получаемого в результате горения водородно-кислородной смеси. Расходные характеристики по низкопотенциальному пару и горючей смеси составляли соответственно 5...9 л/мин ($T \approx 120^\circ\text{C}$) и 2...5 л/мин. Размер частиц 3–4 мм; масса засыпки составляла около 3,5 г.

Характерный график состава основных продуктов газификации для шлама ЦОФ «Березовская» представлен на рисунке 7. Температура процесса газификации, как видно из графика 850°C . Концентрация водорода со временем уменьшается, а оксида углерода увеличивается. Калорийность газа в среднем составляет около 11 МДж/м^3 . В составе газа отсутствует азот, что говорит о возможности его использования в качестве сырья для производства метанола.

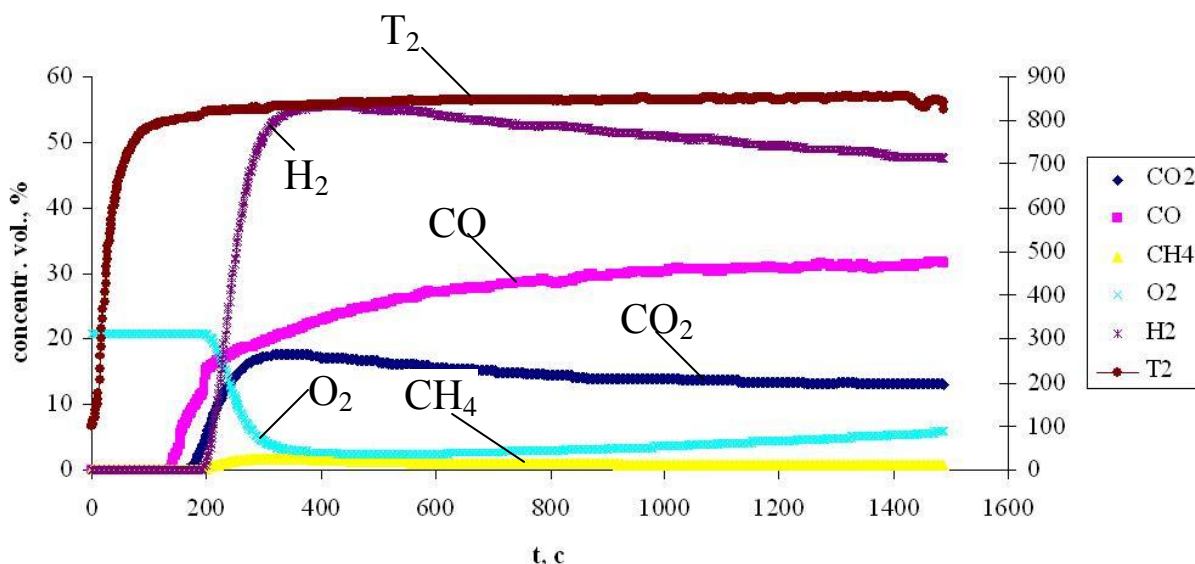


Рис. 7 – Зависимость выхода основных продуктов газификации от времени для шлама ЦОФ «Березовская», температура в слое материала $T_2=850^{\circ}\text{C}$

По результатам оценки разрабатываемых и прошедших промышленные испытания технологий переработки угля и угольных отходов, можно сделать следующее заключение.

Предлагаемые технологии направлены: во-первых и в основном, на использование отходов угледобычи и углеобогащения, во-вторых, на получение не только тепловой и электрической энергии в паротурбинных установках, как в случае сжигания механоактивированного угля микропомола в пылеугольных котлах большой энергетики взамен мазута и котлах малой энергетики как основного топлива, а также сжигания водоугольного топлива в оригинальных топочных устройствах и сжигания отходов мелкодисперсного топлива в ВЦР, но и на получение генераторного газа из нижней зоны газификатора с возможностью его использования для выработки электрической энергии в газотурбинных установках или в газопоршневых электрических станциях и для производства синтетического жидкого топлива или метанола. Развивающееся направление по исследованию паровой газификации углеродсодержащих материалов с получением топливного газа для

газовых котлов или синтез-газа для производства метанола или СЖТ позволит выявить закономерности влияния определяющих параметров и состава исходного сырья на качественный выход газообразного продукта, спроектировать газогенераторную установку и разработать технологический регламент процесса непрерывного производства паровой газификации.

Использование отходов угледобычи и углеобогащения, эффективная зольность которых чаще всего составляет не выше 30%, для выработки тепла и электроэнергии снижает экологическую напряженность региона путем уменьшения количества отходов в виде зольного и шлакового остатка, а также приводит к снижению издержек производства.

Список литературы

1. Электронный бюллетень Коллегии Администрации Кемеровской области. – www.zakon.kemobl.ru.
2. Бурдуков, А. П. Можно ли отказаться от использования мазута для розжига пылеугольных котлов? / А. П. Бурдуков, В. Н. Елин // Уголь. – 2011, № 11. – с. 40.
3. Котов, Ю. И. Снижение мазутной составляющей в топливном балансе Беловской ГРЭС ОАО «Кузбассэнерго» на котлах ПК-40 / Ю. И. Котов, А. П. Бурдуков, В. Н. Елин // Энергетик. – 2011, № 11. – с. 53.
4. Бурдуков, А. П. Использование механоактивированных углей микропола в энергетике / А. П. Бурдуков, В. И. Попов, В. А. Фалеев, Т. С. Юсупов // Ползуновский вестник. – 2010, № 1. – с. 93-98.
5. Мальцев, Л. И. Прикладные аспекты технологии приготовления и сжигания водоугольного топлива / Л. И. Мальцев, И. В. Кравченко, А. И. Кравченко, В. Е. Самборский // Современная наука. – 2011, № 1(6). – С. 25–30.
6. Алексеенко, С. В. Топочное устройство для сжигания водоугольного топлива / С. В. Алексеенко, Л. И. Мальцев, И. В. Кравченко, В. Е. Самборский // Новости теплоснабжения. – 2010, № 7 (119). – С. 22-24.
7. Мальцев, Л. И. На гребне угольной волны / Л. И. Мальцев // Наука из первых рук. – 2009, Т. 29, № 5. – С. 32-36.
8. Алексеенко, С. В. Технология сжигания угля в виде водоугольной суспензии / С. В. Алексеенко, И. В. Кравченко, Л. И. Мальцев // XIV Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии использования угля в энергетике», 18-21 сент. 2012 г., Кемерово. – Кемерово: 2012 (отправлена в печать).
9. Загруддинов, Р. Ш. Технологии газификации в плотном слое / Р. Ш. Загруддинов, А. Н. Нагорнов, А. Ф. Рыжков, П. К. Сеначин. – Барнаул: «Алтайский дом печати», 2009. – 296 с.
10. Пугач, Л.И., Серант Ф.А., Серант Д.Ф. Нетрадиционная энергетика – возобновляемые источники, использование биомассы, термическая подготовка, экологическая безопасность: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. 347 с.
11. Афанасьев, Ю. О. Разработка конструкции гравитационно-рециркуляционной вихревой топки / Ю. О. Афанасьев, П. Т. Петрик, Г. С. Козлова, В. Н. Кочетков // Вестник КузГТУ. – 2006, № 6.2. – С. 120-122.
12. Афанасьев, Ю. О. Испытание циклонного реактора для сжигания высокозольного топлива / Ю.О. Афанасьев, А.Р. Богомолов, Г.С. Козлова, В.С. Медяник // Теплоэнергетика. – 2011, № 12. – с. 47-52.