

ГАЗИФИКАЦИЯ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

Загрудинов Р.Ш.¹⁾, Никишанин М.С.²⁾, Сеначин П.К.^{3, 4)}

¹⁾ ООО «Новые энергетические технологии (НЭТ)», г. Рязань, Россия

²⁾ ООО «Брикетные технологии», г. Барнаул, Россия

³⁾ Алтайский государственный технический университет (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия

⁴⁾ Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Твердые бытовые отходы (ТБО) являются отходами сферы потребления, образующимися в результате бытовой деятельности населения. Они состоят из изделий и материалов, непригодных для дальнейшего использования в быту. При этом состав и объем бытовых отходов чрезвычайно разнообразны и зависят не только от страны и местности, но и от времени года и от многих других факторов. Бумага и картон составляют наиболее значительную часть ТБО (до 40% в развитых странах). Вторая по величине категория в России – это так называемые органические, в т.ч. пищевые, отходы; металл, стекло и пластик составляют по 7-9% от общего количества отходов. Примерно по 4% приходится на дерево, текстиль, резину и т.д. Количество муниципальных отходов в России увеличивается, а их состав, особенно в крупных городах приближается к составу ТБО в западных странах с относительно большой долей бумажных отходов и пластика.

Основным способом термической переработки ТБО на сегодня является их прямое сжигание. Известны также технологии, основу которых составляют процессы газификации, пиролиза, сжигания в шлаковом расплаве и т.д., в том числе с использованием плазматронов, но они имеются в незначительных количествах и практически не влияют на количественную утилизацию [1].

Утилизация мусора является достаточно сложной комплексной программой и простое сжигание неразделенного потока отходов в настоящее время считается чрезвычайно опасным. Оно требует предварительной обработки ТБО (с получением так называемого «refuse-derived fuel», или просто «RDF» т.е. топлива, извлеченного из отходов). При разделении из ТБО стараются удалить крупные объекты, металлы (как магнитные, так и немагнитные) и дополнительно его измельчить. Для того, чтобы уменьшить вредные выбросы из отходов, также извлекают батарейки и аккумуляторы, пластик, листья. Сжигание неразделенного потока отходов в настоящее время считается чрезвычайно опасным.

При этом следует учитывать и экологические воздействия МСЗ, которые в основном связаны с загрязнением воздуха, в первую очередь – мелкодисперсной пылью, оксидами серы и азота, фуранами и диоксинами.

Более высокотехнологическим видом утилизации ТБО является их стадийное сжигание с газификацией при недостаточных избытках воздуха, с возможным разделением потоков газообразных продуктов газификации на «чистый» и «грязный» газ. При этом появляется необходимость декомпозиции процесса, с выделением его отдельных стадий. Так, например, при газификации с двойным отбором газа «грязный» газ легче и дешевле выводить из процесса и сжигать в топках котлов с выработкой тепловой и в дальнейшем электрической энергии. А «чистый» газ направлять либо на производство более ценных продуктов, например синтетические жидкие топлива или другие химические продукты, либо на непосредственную выработку электроэнергии в ГПЭС или ГТУ.

Для газификации RDF в качестве газогенераторов плотного слоя прямого и обращенного процессов могут быть использованы новые разработки ООО «НЭТ», в том числе следующие:

1. Модернизированный двухзонный газогенератор.

Модернизированный двухзонный газогенератор конструкции ООО «НЭТ» (рис.1), является газогенератором прямого процесса с двойным отбором газа с диаметром реактора 3000-3200 мм способным работать в диапазоне давлений от атмосферного до 0,5-0,7 Мпа.

Конструкция газогенераторов с двойным отбором газа уходит корнями к двухзонным ки-

тайским газогенераторам, которые в свою очередь были скопированы в СССР. Основной их особенностью 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. Разработана специальная конструкция газогенератора работающего под давлением, требуемым для входа в камеру сгорания ГТУ без оборудования газовым компрессором. Этот газогенератор оборудуется шлюзовыми системами ввода топлива и вывода зольных остатков.

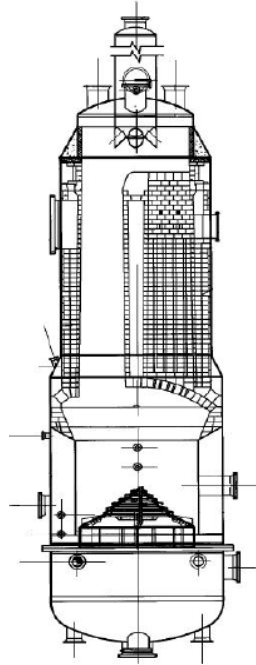


Рис.1. Схема газогенератора с двойным отбором газа.

Особенностями газогенератора с двойным отбором газа являются следующие:

- разделение газогенератора на зоны подготовки топлива и его газификации с отдельным отбором пиролизного газа (или газа карбонизации) и газа газификации полукوكса («чистого» газа);
- 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 фууссов в газогенераторе.

Примеры использования двухзонных газогенераторов атмосферного типа более подробно приведены в [1, 2]. Аналогичным образом и с теми же целями могут быть использованы и двухзонные газогенераторы работающие под давлением. По конструкции они приближены к газогенераторам Лурги, но оборудованы устройством отбора «чистого» газа на границе окислительной и восстановительных зон.

2. Трёхзонный газогенератор обращенного процесса.

На рис.2 представлена трёхмерная модель трёхзонного газификатора, разработанного для Установки по производству жидкого синтетического топлива (ЖСТ) и работающего под давлением 1,4 МПа (для поддержания соответствующего давления в реакторе Фишера-Тропша без использования газовых компрессоров).

Принципы, по которым создавался газогенератор, были сформулированы в УрФУ (УГТУ-

УПИ), специалисты которого уже более 15 лет занимаются проблемами повышения качества генераторного газа в установках плотного слоя. Целью исследований являлось достижения контролируемой локализации структурных и процессных неоднородностей путем принудительной декомпозиции процесса с протеканием отдельных стадий, либо в отдельных аппаратах по многокорпусной схеме, либо в отдельных зонах одного аппарата по многозонной технологии [3-5].

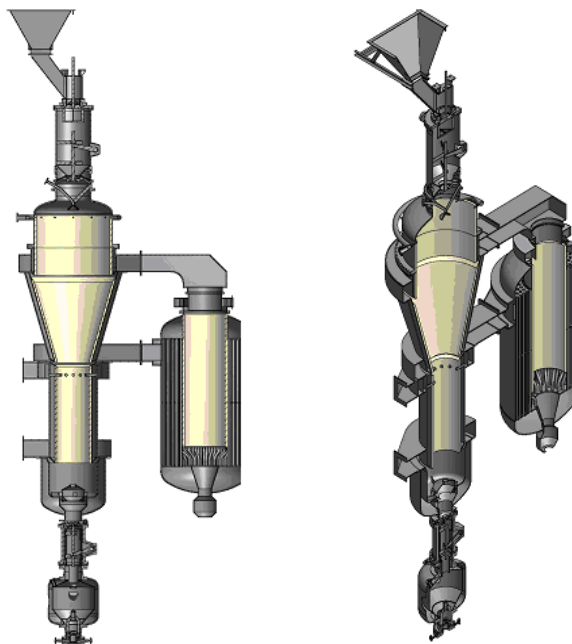


Рис.2. Объёмная модель трёхзонного газификатора

Анализируя схемы декомпозиции, предлагаемые для газификации, авторами [3-5] были сделаны следующие выводы:

- Для обеспечения управления процессом газификации при отсутствии канала регулирования по топливу разработаны многомерные схемы, реализующие термический способ получения малосмольного газа и являющиеся различными модификациями базовых конструкций газогенераторов.
- Газогенераторы с рециркуляцией, на современном этапе технического развития, неперспективны из-за необходимости применения дополнительного сложного оборудования.
- Увеличение выходных потоков приводит к неполному использованию газового потенциала в силовом цикле.
- Наиболее эффективна схема с несколькими входными и одним выходным потоками.

Над созданием конструкции газогенератора, в котором была бы реализована структурная схема процесса трёхступенчатой газификации с декомпозицией, специалисты Инженерного центра «Новые Энергетические Технологии» (ООО ИЦ «НЭТ») работают более пяти лет. При этом разрабатывались модели конструкций однокорпусных аппаратов и аппаратов с выносными камерами сгорания, способных работать при давлениях от атмосферного до 3,0 МПа и в диапазоне производительности по топливу от 0,5 до 5,0 т/ч.

Конструкция трёхзонного газификатора работающего под давлением (показанная на рис.2) разрабатывалась с учётом опыта строительства и эксплуатации Фабрики газификации угля (ФГУ) ПАЗа (г. Павлодар), оборудованного четырьмя газогенераторами Лурги типа Mark-III. Специалисты ООО «НЭТ» принимали активное участие в проектировании и освоении ФГУ [2, 6-9]. Были исследованы характеристики газогенераторов в режимах их работы с паровоздушным и парокислородным дутьём и с паровоздушным дутьём обогащённым кислородом с концентрацией от 21 до 97 %.

При разработке трёхзонного газификатора в части его узлов, а именно, в схемах загрузки топлива и выгрузки золы, были использованы принципиальные решения газификаторов Лурги.

Но существуют и серьёзные отличия – это применение гидравлического управления в системе вращения донной решётки, взамен громоздкого электрического с мощным редуктором.

Установка работает по принципу многостадийной газификации в среднетемпературном диапазоне (850–1200°C) с контролируемой кинетикой восстановительных реакций и плавкостными свойствами золы и производит газ, не содержащий метана и других углеводородов. Процесс протекает при ограниченном и заведомо меньшем, чем требуется для полного сжигания органического топлива, расходе окислителя, в качестве которого принято воздушное дутьё. При этом, получаемый синтез-газ после его очистки может быть использован в качестве исходного продукта, как для синтеза жидкого топлива, так и для выработки электроэнергии.

В газогенераторе последовательно выделяются три зоны развития процесса термообработки топлива:

- В верхней части газогенератора расположена первая зона, в которую подается контролируемый расход горячего воздуха, здесь осуществляется сушка топлива, его карбонизация с выделением летучих и горючих компонентов.

Реактор первой зоны представляет собой вертикальный цилиндрический канал, футерованный изнутри теплоизоляционным и износостойчивым материалом. Диаметр (1300-1700 мм) и высота (700-1000 мм) канала выбирается при проектировании конкретного объекта.

- В средней части газогенератора (вторая зона) происходит разделение газообразного и твердофазного продуктов термообработки угля; газовые продукты отводятся из реактора в специальный объем (КС), где при подаче горячего воздуха осуществляется выжигание смол, фенолов и других горючих веществ.

Поток полукокса отдельно отводится вниз по вертикальному каналу реактора, конически сужающегося по высоте, футерованного изнутри теплоизоляционным и износостойчивым материалом. Начальный диаметр канала соответствует диаметру канала первой зоны, конечный – диаметру канала третьей зоны. Высота канала уточняется при проектировании и увязке всех геометрических размеров реактора для оптимальной газификации конкретного твёрдого топлива.

Камера сгорания (КС) пиролизных газов представляет собой двухкамерный сосуд, установленный непосредственно у основного корпуса газогенератора, работающий под давлением и состоящий из двух последовательных камер – огневой (ОК) и конвективной (КК). Газ отводится из фурм, установленных в нижней части первой зоны и подаётся в вихревую горелку камеры сгорания.

Огневая камера представляет собой цилиндрический канал диаметром 1000 мм, экранированный мембранной панелью из труб $\varnothing 60 \times 6$ мм и футерованный огнеупорным материалом с огневой стороны. Огневая камера располагается по оси сосуда, в верхней её части располагается низконапорная по газу горелка с вихревым подводом горячего воздуха. Высота огневого канала составляет примерно 3,0-3,5 м.

В нижней части огневого канала расположены проходы по периметру (фестонированные трубы экрана), через которые горячие газы поступают в конвективную камеру.

Объем обогреваемой среды спроектирован как охлаждаемый объем с использованием воды в качестве рабочей среды. Питательная вода подается через штуцеры в нижней части КС из парового коллектора (барабана). Образовавшийся пар отводится из купола КС в паровой коллектор (барабан).

- В нижнюю часть газогенератора (третья зона) поступают три потока – полукокс (по каналу реактора), раскаленные газы – продукты окисления газосмольного потока из КС и воздушное (или паровоздушное) дутьё.

Ввод паровоздушного дутья осуществляется в канал ввода продуктов сгорания непосредственно перед подачей их в третью зону газификации. Канал третьей зоны реактора имеет цилиндрическую форму диаметром 800-1200 мм. На расстоянии примерно 1500 мм ниже располагаются фурмы отвода силового газа (или синтез-газа). Ниже канал содержит зольную подушку, предохраняющую от пережога, так называемую, «колосниковую решётку». Последняя, как таковая решёткой не является, а представляет собой плоское дно со спиральным оребрением и устройством сброса золы в зольный шлюз.

3. Особенности газификации твёрдых бытовых отходов (ТБО).

В принципе, оба типа представленных выше газогенераторов предназначены для работы с широким спектром подготовленных низкосортных твёрдых топлив. В качестве исходного топлива могут быть использованы отходы угледобычи и углеобогащения, высоковлажные и высокозольные угли, не нашедшие применения в большой энергетике, биомасса (древесные отходы, отходы животноводства и растениеводства и пр.) и ТБО. Конечным продуктом предварительной подготовки топлива для газификации должны быть брикеты с рабочей влажностью до 13-15 % и размерами:

- для двухзонного газогенератора работающего при атмосферном давлении и под давлением до 0,5 МПа цилиндрической формы с наружным диаметром примерно 30 мм, длиной 30-40 мм и с внутренним каналом диаметром 10 мм;
- для трёхзонного газогенератора работающего под давлением – цилиндрической формы с диаметром примерно 15-20 мм и длиной 25-30 мм.

Для газификации ТБО в представленных газогенераторах используется предварительно подготовленный конечный продукт RDF. К этому классу топлива относятся практически все виды топлив, полученные из ТБО, без различия каким путём они получены. Причём предварительный этап приготовления RDF, так называемый «front-end» является общим для всех способов его производства.

Состав оборудования системы «front-end», то есть наличие сепарации прочных негорючих материалов, включая магнитных, измельчителей, грохотов, воздушных классификаторов, баллистического сепаратора, сепарации с инфракрасными лучами и пр. во многом зависит от композиционного состава ТБО, как сырья. По сути дела на этом начальном этапе происходит первичное облагораживание ТБО и его подготовка к следующему этапу, т.е. термической переработке («обжариванию» без доступа окислителя) измельчённого и отсепарированного материала и его брикетированию.

ООО «НЭТ» был выполнен прогнозный анализ поведения и превращения различных компонентов, содержащихся в ТБО, в процессах прохождения всех этапов газификации в трёхзонном газогенераторе. Целью анализа являлось возможное содержание вредных веществ в синтез-газе и определение способов их удаления.

Для анализа были использованы материалы по исходным данным ТБО любезно предоставленные компанией «Genefield Recycling» и содержащие глубокий химический анализ по составу 127 проб ТБО, в сыром и предварительно обработанном виде (RDF).

При этом более 100 проб представляли собой уже подготовленные материалы RDF, полученные с использованием воздушной классификации, баллистической сепарации, биологической переработки, сепарации инфракрасными лучами и пр.

По зольности, влажности и теплоте сгорания все пробы смешанного ТБО и RDF находились в широком диапазоне. При этом частично переработанные топлива (после биологической переработки и т.п.) имели меньшую влажность и более высокую теплоту сгорания.

Известно, что твёрдые бытовые и коммунальные отходы, поступающие на газификацию, содержат в своем составе большое количество различных компонентов (по некоторым литературным источникам их более полутора тысяч). Условно из ТБО можно выделить группы металлов, неметаллов и углеводородсодержащих соединений. И их поведение в различных частях газогенератора отлично друг от друга. Но обобщенно можно сказать, что большая часть металлов перейдет в шлак, а большая часть углеводородсодержащих компонентов окислится. И продукты окисления будут участвовать в процессах, происходящих в газогенераторе.

При термическом разложении ТБО в Зоне 1 выделяются смесь газообразных продуктов, дёгтя, нерастворимых в воде масел, водного раствора уксусной кислоты, метанола и других органических соединений. В твёрдом остатке (полукоксе) остаются инертные компоненты отходов и древесный уголь. Выход газообразных продуктов сильно меняется, однако по массе он составляет примерно 25% высушенных воздухом беззольных отходов; их теплота сгорания примерно равна 11,18-13,04 МДж/м³.

При этом из отходов возгоняются кристаллогидратная и гигроскопическая влага, происходит разложение хлорсодержащих компонентов из различного рода полимеров и пластмасс, про-

исходит также разложение серосодержащих элементов, окисление серы, возгонка серного ангидрида и пр. В этой зоне возгоняется также ряд легкоплавких металлов, таких, как щелочные металлы (калий и натрий). Возгоняются также пары ртути из ртутосодержащих компонентов. Все газообразные продукты возгонки, вместе со смолами в газообразной форме и горючим полукоксовым газом, поступают в камеру сгорания.

Твердый продукт, или полукокк, образующийся в результате пиролиза мусора, представляет собой неочищенный углерод (исключая золу), очень близкий по данным приближенного анализа к составу угля. Выход полукокка равен примерно 17-25% по массе и уменьшается с ростом скорости нагревания и температуры пиролиза. Теплота сгорания полученного полукокка из ТБО по данным [10] находится в диапазоне 25,63-27,96 МДж/кг. Содержание золы в полукокке варьируется, по-видимому, между 50 и 60 % по массе.

Таким образом, отходы не способные при этих условиях возгоняться в составе полукокка двигаются вниз по каналу реактора газогенератора через зону аэродинамического затвора.

Продукты возгонки из зоны пиролиза в камере сгорания подвергаются окислению. Адиабатическая температура в центре камеры сгорания достигает 1700-1800 °С. В этой зоне вместе с горючими компонентами (СО, Н₂, СН₄ и др.) сгорают и сопутствующие органические вещества, диоксины и фураны. Пары металлов присутствующие в газе выходят из камеры сгорания вместе с продуктами сгорания пиролизных газов и поступают в зону газификации полукокка.

Углеводородсодержащие компоненты отходов подвергаются в газогенераторе (в выносной КС и активной зоне) расщеплению и окислению. Этому способствуют высокие температуры, наличие окислителя и достаточное время пребывания. К этим компонентам относятся:

Бензол, толуол, этилбензол, о-ксилол, р-ксилол, m-ксилол, нафталин, Acenaphthalin, Acenaphthen, Fluoren, Phenanthren, Anthracen, Fluoranthen, Pyren, Benz (a) anthracen, Chrysen, Benzo(b)fluoranthen, Benzo(k)fluoranthen, Benzo(a)pyren, Indeno (1,2,3-cd) pyren, Dibenz(a,h)anthracen, Benzo(g,h,i)perylene, 1,1,1-Trichlorethan, Tetrachlorethen, Trichlormethan, Tetrachlormethan, Dichlormethan

В Зоне 3 происходит газификация полукокка при подаче требуемого количества воздушного дутья. Температура в активной зоне составляет 900-1100 °С в зависимости от плавкостных характеристик полукокка. Безопасный уровень температур поддерживаются добавлением в дутьё холодного водяного пара.

Температура генераторного газа на выходе из газогенератора находится в интервале 600-800 °С. Эти температуры определяют, какие компоненты бытовых отходов могут в газовой фазе выходить из газогенератора вместе с генераторным газом, а какие остаются в шлаке. Из приведенного ниже перечня только первые четыре компонента имеют температуру возгонки ниже, чем температура генераторного газа на выходе:

Ртуть, сера, мышьяк, селен, кадмий, натрий, цинк, теллур, калий, магний, таллий, кальций, сурьма, свинец, цинк (ZnO), марганец, барий (BaO), кремний, алюминий, медь, олово, хром, никель, кобальт, бериллий, железо, титан, ванадий, молибден.

Остальные компоненты, имеющие температуру возгонки выше температуры генераторного газа остаются в зольном остатке (шлаке). То есть, ртуть, мышьяк и селен сохраняются в газе и подлежат последующему извлечению из газа.

Кроме целевых горючих компонентов (СО и Н₂) в генераторном газе выходящем из газогенератора содержатся еще и балластные азот и влага и побочные: ртуть, мышьяк, селен и серосодержащие, хлорсодержащие и азотсодержащие компоненты.

Несмотря на существующие в мире жесткие экологические требования, «диоксиновую проблему» при сжигании ТБО на сегодня можно считать решенной. Как и всякое органическое вещество, диоксины и фураны сгорают в топке при высокой температуре и достаточной концентрации кислорода. Стандарт Европейского союза [11] требует, чтобы продукты сгорания находились в топке или газоходе при температуре не ниже 850°С не менее 2 с при содержании в них кислорода не менее 6% (по объему). Однако, при наличии в продуктах сгорания бензолподобных соединений и хлора, диоксины могут снова образовываться в окислительной среде при температурах от 250 до 500°С (так называемые вторичные диоксины, которые улавливаются в системе газоочистки). Для предотвращения выбросов вторичных диоксинов схема сжигания зна-

чительно удорожается необходимостью оборудования её установкой хемосорбция хлора и хлористого водорода и дополнительным газовым котлом для сжигания образовавшихся вторичных диоксинов.

В установке газификации вариант образования вторичных диоксинов исключён, так как полностью отсутствует окислительная среда.

Согласно предварительной проработке системы очистки генераторного газа, она должна включать в себя (последовательно по схеме движения генераторных газов):

- Впрыск водного раствора карбамида (мочевины – $\text{H}_2\text{N-CO-NH}_2$) через трубы Вентури установленные в газоходах непосредственно за газогенератором. Цель – хемосорбция хлора и хлористого водорода, связывания оксидов азота и сернистых соединений водным раствором карбамида.

- Воздухоохлаждаемый прямоточный циклон для улавливания крупнодисперсной пыли, одновременно являющийся второй ступенью воздухоподогревателя.

- Фильтр для улавливания паров ртути с очисткой газа в слое активированного угля. Причём, здесь же, кроме ртути, происходит частичное улавливание наиболее широко применяемых тяжелых металлов, а именно, свинца, хрома, меди, марганца, сурьмы, мышьяка, кобальта, никеля, ванадия, кадмия, таллия, но основное их предназначение – улавливание ртути, свинца, таллия и кадмия.

- Наиболее важным компонентом очистки генераторного газа или синтез-газа является его полная очистка от сернистых соединений, в основном от сероводорода. При подготовке генераторного газа для выработки электроэнергии степень очистки его от сернистых соединений регламентируется допустимым содержанием.

При подготовке синтез-газа для производства жидкого синтетического топлива степень очистки его от сернистых соединений максимальная, т.е. содержание сернистых соединений в нём практически должно быть равно нулю. Катализаторы процесса очень чувствительны даже к минимальнейшему содержанию серы, поэтому, в отличие от генераторного газа для ГТУ или ГПЭС, где допускается некоторое количество сероводорода (например, для ГПЭС до 200 мг/м^3), синтез-газ должен иметь нулевое серосодержание.

При содержании H_2S на выходе более 200 мг/м^3 установка оборудуется двухступенчатой системой сероочистки:

- блоком первичной очистки газа от сернистых соединений с содержанием H_2S на выходе $\leq 0,02 \text{ г/м}^3$;

- блоком тонкой очистки газа от сернистых соединений с содержанием H_2S и меркаптанов на выходе - 0 г/м^3 .

В качестве абсорбента на установке очистки газа предполагается использовать водный раствор моноэтаноламина с массовым содержанием 17 %. Для приготовления рабочего раствора используется технический моноэтаноламин и пароконденсат. Показатели качества моноэтаноламина в соответствии с ТУ 6-02-915-84.

Основные результаты предварительного расчёта теплового баланса Установки по производству ЖСТ из RDF.

Расчёты показывают, что, как прямое сжигание, так и газификация ТБО с целью выработки тепловой и электрической энергии коммерчески являются убыточными без государственных или муниципальных субсидий. Однако, при производстве из ТБО продукции с более высокой добавочной стоимостью, например, ЖСТ или химические материалы, появляется и коммерческая выгода.

В рамках составления Техничко-коммерческого предложения по проектированию и строительству Установки по производству ЖСТ мощностью 5 тыс. тонн в год были выполнены предварительные тепловые расчёты:

- расход брикетов (с принятой теплотой сгорания на рабочую массу $17,6 \text{ Мдж/кг}$) – 4000 кг/ч ;

- количество полученного синтез-газа (сухого) – $9780 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Согласно расчётам, термический КПД брутто (без учёта затрат электроэнергии на собственные нужды) Установки составит 82,4 %.

Максимальные затраты на собственные нужды приходятся на воздушный турбокомпрессор. По предварительным оценкам эта составляющая может составить 800-1000 кВт-ч. Принимая условие, что вся выработанная электроэнергия уйдёт на собственные нужды, то расчётный КПД нетто Установки составит примерно 76,8 %.

Стоимость строительства составит примерно 9,6 млн. долларов США.

Список литературы

1. Загруддинов, Р.Ш. Подготовка и газификация твердых бытовых отходов в двухзонных газогенераторах прямого процесса, работающих в составе мини-ТЭЦ и комплексов по производству синтетических жидких топлив / Р.Ш. Загруддинов, В.Н. Негуторов, Д.Г. Малыхин, П.К. Сеначин, М.С. Никишанин, С.А. Филипченко // Ползуновский вестник. – 2013. - № 4/3. – С. 47-62.
2. Слоевые газогенераторы для региональной энергетики / Загруддинов Р.Ш., Рыжков А.Ф., Богатова Т.Ф., Малыхин Д.Г. Попов А.В., Негуторов В.Н. – Электрические станции, 2012, № 10. – С. 42-49.
3. Попов А.В., Рыжков А.Ф., Силин В.Е. Исследование процессов многозонной газификации биомассы / «Горение твёрдого топлива»: Сборник докладов VI Всероссийской конференции (с участием иностранных учёных), Часть 3 // Новосибирск, 8-10 ноября 2006 г. – С. 126-136.
4. Попов А.В., Рыжков А.Ф. Управляемый процесс газификации биомассы // Промышленная энергетика, 2008.- № 1. - С. 27-31.
5. Рыжков А.Ф., Силин В.Е., Попов А.В., Усова Г.И. Экспериментальные исследования кинетики конверсии высокорекреационных топлив / Современная наука. Сборник научных статей, 2011, №3 (8), С. 13-20.
6. Загруддинов, Р.Ш. Исследование технологического режима газогенераторов Лурги при парокислородной газификации углей под давлением / Автореф. дис. ... канд. тех. наук, Алт.ГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул, 2008. – 24 с.
7. Загруддинов, Р.Ш. Технологии газификации в плотном слое: монография / Р.Ш. Загруддинов, А.Н. Нагорнов, А.Ф. Рыжков, П.К. Сеначин и др.; под ред. П.К. Сеначина. – Барнаул: ОАО «Алтайский дом печати», 2009. – 296 с.
8. Опыт газификации в плотном слое с паровоздушно-кислородным дутьем при различных концентрациях кислорода в дутье / Р.Ш. Загруддинов, А.Н. Нагорнов, С.Н. Шитова, П.К. Сеначин // Международная научно-техническая конференция «Технологии эффективного и экологически чистого использования угля».- Москва, ВТИ, 2009.- М.: Изд-во ВТИ, 2009.- С. 185-194.
9. Нагорнов А.Н. Исследование и разработка технологии газификации малозольных углей в плотном слое под давлением при паровоздушном дутье / Автореф. дис. ... канд. тех. наук, Алт.ГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул, 2010. – 20 с.
10. Утилизация твёрдых отходов / Под ред. Д.Вилсона. В двух томах. М.: Стройиздат, 1985. Том 1 –336 с., Том 2 –348 с.
11. Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on incineration of waste// Official Journal of European Communities, 28.12.2000. - P. 332/91-332/111.