

Газификация растительного сырья (биотоплива) как доступного и дешевого альтернативного источника энергии взамен неуклонно дорожающих природных ископаемых источников энергии интересует большинство стран мира. В России это ощущается особенно остро в таких отраслях как лесопромышленный комплекс, сельское хозяйство, перерабатывающая промышленность и другие отрасли промышленности, где накапливается большое количество не утилизируемых отходов [3]. Вообще большинство запатентованных сегодня «инновационных» технологий газификации конденсированного топлива зародились 1930-1950 годах и Советский Союз был одной из ведущих мировых держав в этой области. В 60-70-е годы прошлого века, в связи с ростом объемов добычи природного газа и нефти в мировом, энергетическом балансе произошли серьезные изменения, из-за чего конкурентоспособность газификации твердого топлива снизилась и повсеместно, за редким исключением, прекратилось производство генераторных газов (синтез-газов). И вот на стыке XX и XXI веков, в связи с тенденцией сокращения мировых запасов углеводородных ресурсов и перманентным повышением их стоимости, вновь возник повышенный интерес к технологиям газификации твердой растительной биомассы, и в первую очередь древесины. Если проанализировать конструктивные особенности и принципы действия современных промышленных газогенераторов можно выделить четыре основополагающих инженерных решений. 1. Создание Friyz Winkler в 1926 г. газогенератора с кипящем слоем. Эта технология послужила основой для многих современных процессов [6]. 2. Технологии ГТТ под высоким давлением (например, газогенераторы Лурги), с использованием тепла атомных и термоядерных реакторов, с встроенными плазмотронами и множество других. Использование повышенного давления для интенсивного процесса газификации реализовано почти во всех современных промышленных газогенераторах [5]. 3. Разработка Heinrich Koppers Friedrich Totsek в 1944-45 гг. пылеугольного газогенератора с жидким шлакоудалением. Первый промышленный аппарат этого типа был построен в 1952 г. в Финляндии. Пылеугольный принцип газификации с жидким шлакоудалением так же реализован во многих в промышленных аппаратах [9, 10, 11]. 4. Разработка фирмой «Техасо» в 1950-е годы газификаторов для переработки тяжелых нефтяных остатков. Всего построено 160 установок. В 1970-е годы была разработана модификация аппарата «Техасо» для газификации водоугольной суспензии. Рис. 1 - Схема плазменной установки: 1 - реактор-газификатор; 2 - генератор плазмы основной (мощностью до 50 кВт); 3 - дожигатель; 4 - генератор плазмы дополнительный (мощностью до 6 кВт); 5 - скруббер распылительный; 6 - скруббер насадочный; 7 - вентилятор вытяжной Среди последних можно отметить технологию плазменной газификации «BioSynGas», разработанную американской фирмой «Solena», технологию «PGM», продвигаемую на территории России и стран СНГ ООО «Эко Прогресс Энерджи» («дочкой» российско-израильской компании

«Environmental Energy Resources Ltd»), технологии плазменной газификации твёрдых отходов «Московского радиотехнического института РАН» и «Института электрофизики и электроэнергетики РАН» [7]. Если раньше технологии газификации рассматривались лишь применительно к использованию для выработки тепловой энергии, то сегодня все активнее рассматриваются возможности эксплуатации газогенераторных установок (ГГУ) для комбинированной выработки тепловой и электрической энергии [1]. Самым эффективным промышленным способом преобразования первичной энергии в электроэнергию является комбинированный парогазовый цикл, в котором используется только газообразное топливо, поэтому для получения электроэнергии из твердого топлива (той же древесины) его необходимо предварительно газифицировать, превратив в газогенераторный газ - смесь, состоящую в основном из водорода и монооксида углерода. Среди серьезных проблем, препятствующих широкому использованию генераторного газа, выработанного при газификации древесины, - его низкая теплотворность, а также смолообразование, которое происходит при охлаждении газа до температуры ниже 200 °С. В состав смол входит целый ряд ароматических соединений, таких как бензол, толуол, крезолы. Смола образуется на внутренних поверхностях газопроводов, на рабочих поверхностях газовой турбины и на поршневой группе газовых моторов. Поэтому при использовании генераторного газа в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) автотранспорта и танков во время Второй мировой войны и в послевоенное время, по регламенту, через весьма непродолжительный период эксплуатации требовалась полная очистка двигателя от смолы. Надо отметить, что процесс смолообразования при газификации до конца еще не изучен. «При проектировании аппаратов газификации твердого топлива возникают затруднения, связанные с отсутствием надежных методик расчета процессов неполного горения. Это связано с тем, что не существует простых и одновременно реалистичных физико-химических моделей процессов неполного окисления реальных топлив». Сегодня в Европе существуют три концепции решения проблем смолообразования при газификации: ● так называемая газификация без смолообразования может быть реализована только при сверхвысокой температуре, которая достигается при использовании чистого кислорода. Такая технология, применяемая в газификаторах компаний Shell, Prenflo, Carbon, в связи с очень высокой стоимостью (оборудование для получения чистого кислорода, его подача и пр.), используется только на очень больших объектах; ● очистка холодного газа и использование газовых поршневых двигателей (дизель или мотор Отто). Применяются очистка охлажденного генераторного газа водой, а также используются катализаторы и электрофилтры. В связи с высокими инвестиционными затратами и большими издержками на утилизацию отходов (сточные воды, фильтр), такая технология не получила распространения; ●

очистка горячего генераторного газа и использование газовой турбины. Самое простое решение проблемы смолообразования при газификации - не охлаждать генераторный газ ниже температуры конденсации смолы. Тогда углеводороды остаются в газовой фазе и повышают качество сгорания газа в газовой турбине. При реализации такой концепции применяют аллотермический процесс газификации рис. 2. Рис. 2 - Энергетический баланс процесса газификации По способу подвода энергии различают автотермический и аллотермический процессы газификации. При автотермическом процессе тепловая энергия для достижения необходимого температурного уровня поступает от сгорания части сырья, а при аллотермическом процессе - подводится извне. При автотермическом процессе из-за низких температур и сжигания части топлива генераторный газ загрязняется балластными примесями и вредными веществами, что снижает эффективность его дальнейшего использования [12]. Аллотермический процесс был выбран для реализации пилотного проекта в баварском регионе Ахенталь, в ФРГ. Этот проект, по мнению экспертов, должен привести к прорыву в области газификации древесины. Местная ТЭС и региональная теплоцентраль в коммуне Грассау введены в эксплуатацию в 2010 году. На топливный склад завозится щепа трех стандартов: щепа самого высокого качества по EN-нормам, которая частично продается частным лицам для личного пользования; щепа средней категории качества, которая полностью идет на газификацию; лесная топливная щепа с корой, сучьями, листьями, которая частично газифицируется, а остатки сжигаются в биотопливном котле. Тепло, вырабатываемое на этой ТЭС, поступает по 11-километровому трубопроводу к 550 частным домам и на муниципальные объекты. Общая площадь станции с топливным складом составляет 90 м². В составе ТЭС топливный склад с транспортерами и «живым дном», газификатор на базе HR-реактора и ВНКВ (когенерационный модуль - блочный газовый мотор) мощностью 400 кВт. Общий КПД станции - 80%, так называемый КПД холодного газа - 70%. КПД по электроэнергии - 30%. Таких показателей эффективности совсем недавно можно было достигнуть только на больших ТЭС. Газификатор выполнен в виде цилиндра диаметром всего 850 мм и смонтирован на бетонном фундаменте 2,5 × 2,5 м, а верхняя часть установки изготовлена из специального прозрачного материала и в темноте светится бледно-зеленым цветом - за счет непрерывно происходящих химических процессов газификации. Газификатор, как было сказано выше, работает по принципу аллотермического процесса газификации в циркуляционном кипящем слое. Газовым потоком путем подачи водяного пара создается кипящий (псевдооживленный) слой из песка и топлива во взвешенном состоянии. Кипящий слой - специфическое состояние слоя мелкозернистого материала, который продувается потоком газа. За счет большой турбулентности обеспечивается интенсивное движение частиц топлива и песка, которые при температуре 800 °С и преобладании в газовой смеси

водорода и окиси углерода начинают распадаться. Песок и крупные негазифицированные частички топлива возвращаются в зону газификации. При дальнейшем увеличении скорости потока газа, излишки газа, сверх необходимого для псевдоожижения, проходят через слой в виде пузырей, что создает эффект, схожий с бурно кипящей жидкостью, отчего и возникло название «кипящий слой». При использовании описанного выше метода на выходе получается в 2,25 раза больше генераторного газа, чем при газификации путем подачи воздуха. Разумеется, требуется дополнительный подвод тепла [2].

Камера сгорания представляет собой цилиндр высотой 8 м (1/3 общей высоты сооружения), расположенный ниже газификатора. Около 3/4 используемой для газификации биомассы поступает напрямую в газификатор-реформер, а 1/4 - в камеру сгорания. В момент, когда в газификаторе достигается давление 4-5 бар, дутьевым вентилятором в зону горения (окисления) снизу начинается подача воздуха рис. 3.

Рис. 3 - Схема процесса газификации

Для достижения максимальной эффективности процесса выполняется отбор дымовых газов из камеры сгорания и отвод тепла из газификатора для подготовки пара. За счет этого генераторный газ охлаждается до 300 °С перед прохождением через патронный фильтр, который задерживает песок и крупные частицы топлива и направляет их снова в камеру сгорания. Для очистки от смол с помощью рапсметилэфира (РМЭ) используется специальное устройство: скруббер. Очистка газов от примесей с помощью скрубберов относится к мокрым способам. Этот способ основан на промывке газа жидкостью (РМЭ) при максимальной поверхности контакта жидкости с частицами аэрозоля и самом интенсивном перемешивании очищаемого газа с жидкостью. В скруббере за счет испарения происходит охлаждение генераторного газа - сначала до 120 °С, далее примерно до 75 °С. Вследствие этого конденсируется водяной пар, составляющий 35-40% объема синтез-газа. Расход РМЭ - около 4 л в час, воды - 60 л в час. Около 3% водяного пара остается в объеме синтез-газа, который сжигается в модуле ВНКВ и выводится с выхлопными газами. РМЭ, который содержит после фильтрации длинные цепи углеродов в виде смол и дегтя, сжигается в камере сгорания. Для газогенерации с использованием водяного пара необходим эффективный подвод тепла извне. Инновационный метод Heatpipe-Reformer состоит в том, что проблема подвода тепла решается просто и малозатратно, с помощью так называемых Heatpipes (закрытых трубок с внутренней капиллярной структурой, заполненных рабочей жидкостью жидким натрием или калием, - которая испаряется в зоне горения и конденсируется в охлаждаемой зоне). По этим трубкам можно переносить необходимые потоки тепла при незначительном перепаде температуры, что повышает эффективность теплообмена между камерой сгорания и реформером (газификатором). При этом достигается значительный коэффициент теплообмена и подвод тепла лимитируется только теплообменом поверхностей трубок и кипящего слоя. По капиллярам внутренней

структуры трубок происходит обратный сток конденсата. Краткие технические характеристики вышеописанного газификатора: генерация электроэнергии - 400 кВт, генерация тепловой энергии - 630 кВт при температуре 90/70 °С, теплотворность генераторного газа (синтез-газа) - 11 000 кДж/м³, что в два с лишним раза превышает теплотворность газа при газификации по автотермическому процессу; используемое топливо - пеллеты, щепа, древесные отходы после ландшафтных работ (ухода за парками, посадками вдоль автобанов, ветрозащитными лесополосами и др.) влажностью до 25%. Годовое потребление - 2000 т в пересчете на сухую основу. Технология была разработана в Техническом университете Мюнхена, первый прототип изготовлен еще в 2002 году. Функциональный принцип Heatpipes применяется во многих технических разработках, например при охлаждении процессоров в компьютерах. Тестовая модель с микротурбиной испытывалась в 2004 году. Перед разработчиками технологии была поставлена цель: реализовать стандартные проекты такой газификации в малой, децентрализованной, энергетике. На кафедре ПДМ КНИТУ с 2004 года ведутся исследования по газификации древесных отходов [1-35]. В настоящее время исследования по газификации преследуют цель получить синтез-газ для синтеза новых веществ. На рис. 4 представлена схема, разработанной технологии плазменной газификации древесной биомассы с получением метанола. Рис. 4 - Схема получения метанола из древесной биомассы. Согласно представленной схеме, синтез-газ полученный путем плазменной газификации древесных отходов газогенераторе 1, проходит очистку от золы и мелкодисперсных частиц в циклоне 2. После циклона синтез-газ поступает в компрессор 3а, для компримирования до 4 МПа. Полученный сжатый газ смешивается в газовом эжекторе 4 с циркуляционным газом, поступающим из сепаратора 9 и подается в дожимной компрессор 3б, на выходе из которого газ имеет давление 5,6 МПа. После компримирования синтез-газ поступает в трубное пространство рекуперативного теплообменника 5, где газ нагревается за счёт тепла газа, отходящего из реактора синтеза метанола и проходящего по межтрубному пространству. Температура нагретого газа на выходе из теплообменника составляет 180-230 °С. Далее газ проходит электронагреватель 6, где полученная смесь газов подогревается до температуры не более чем 250 °С. Электронагреватель работает преимущественно в пусковой период, а также служит для поддержания оптимальной температуры газа перед входом в реактор синтеза. Электронагреватель представляет собой систему трубок и нагревательных лент, расположенных на цилиндрической обечайке. До электронагревателя газ разделяется на два потока - основной и вспомогательный. Основной поток, пройдя электронагреватель, поступает в верхнюю часть реактора синтеза 7, а вспомогательный охлаждающий поток (байпас) подается в боковую часть реактора, так как газ, проходя через катализатор в реакторе нагревается в

результате протекания экзотермических реакций, и может достигать свыше 300 °С, что не приемлемо. Из реактора парогазовая смесь выходит с температурой не более 280 °С и объёмной долей метанола 3,0-5,0 %. Далее газ поступает в трубное пространство рекуперативного теплообменника 5, где охлаждается до температуры около 150 °С. После теплообменника 5 газ доохлаждается в аппарате водяного охлаждения 8, до 40°С. Конденсирующаяся смесь метанола и воды (метанол-сырец) поступает в сепаратор 9, где отделяется от циркуляционного газа, проходя сепарирующие устройства, и поступает в сборник метанола-сырца 10. Давление циркуляционного газа на выходе из сепаратора контролируется. С целью исключения возможности накопления циркуляционного газа выше регламентируемой нормы датчик расхода, установленный на выходе из сепаратора, подает сигнал на привод регулируемого клапана для сброса лишнего газа. При снижении расхода ниже заданного значения клапан закрывается. Для контроля состава реакционного газа на выходе из газогенератора и сепаратора установлены пробоотборники, через которые газы постоянно поступают в газоанализатор, который контролирует концентрации компонентов в смеси газов. Не соответствующий заданным параметрам циркуляционный газ отправляется на сжигание в топку. Весь подпор давления в системе получения метанола обеспечивается регуляторами давления, каждый из которых имеет свой заранее установленный диапазон регулирования. В сборнике метанола-сырца 10 помимо жидкой фазы содержится и газообразная, которая впоследствии в виде танковых газов удаляется из сборника и отправляется на сжигание в топку. Нужно отметить, что в мире ведутся интенсивные исследования в области переработки синтез-газа в метанол, являющиеся сырьем для получения ряда важных промышленных продуктов. При определенных условиях переработка сырья в химическую продукцию становится экономически целесообразной и выгодной. В Стратегии инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года указано, что к 2020 году совокупная доля возобновляемых источников в производстве электроэнергии без учета крупных ГЭС должна составить 4,5% (во всем мире - 20%). Сегодня эта доля всего 0,5%. Так что у биоэнергетики есть большой потенциал для развития, но для его реализации требуется поддержка государства [4].