

Р. Г. Сафин, Н. Ф. Тимербаев, А. Р. Садрtdинов,
Д. Б. Просвирников

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ВЫСОКОВЛАЖНЫХ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ В ВЫСКООКТАНОВЫЕ КОМПОНЕНТЫ МОТОРНОГО ТОПЛИВА

Ключевые слова: технология, отходы, газификация, синтез-газ, каталитический синтез, метанол, диметилэфир, высокооктановые компоненты, моторное топливо, промышленная реализация

Разработана технология переработки высоковлажных древесных отходов в высокооктановые компоненты моторного топлива с полным автоматизированным управлением. Изготовлен опытный образец установки термического катализа производительностью по исходному сырью 130 кг/час, по конечному продукту 24 л/ч компонентов моторного топлива.

Keywords: technology, waste, gasification, synthesis gas, catalytic synthesis, methanol, dimethyl ether, high-octane motor fuel components, industrial sales

The technology of processing high-damp wood waste into high-octane motor fuel components with complete automated management is designed. The prototype installation of thermal performance of catalysis by feedstock 130 kg/h, the final product 24 l/h motor fuel components.

Одной из актуальных проблем современного мира является поиск и нахождение возобновляемых энергетических и сырьевых ресурсов, которые могли бы составить достойную конкуренцию нефти и природному газу, мировые запасы которых медленно уменьшаются, а цены непрерывно растут. Одним из таких источников можно рассматривать биомассу, основную долю которой составляет древесина. Весомым достоинством древесины как топлива является низкое содержание серы и других вредных примесей в ее составе, а также воспроизводимость данного источника энергии. При правильном подходе к использованию лесных ресурсов мы получаем практически неисчерпаемый энергетический и сырьевой ресурс. На предприятиях лесопромышленного комплекса ежегодно образуются миллионы тонн древесных отходов. Основным способом их утилизации на сегодняшний день является прямое сжигание с получением тепловой энергии. Перспективным и более эффективным методом является процесс газификации с получением генераторного газа, который может использоваться как для получения тепловой энергии, так и для производства продуктов химической промышленности. В химической промышленности используется синтез-газ – смесь водорода и окиси углерода, который является основным сырьем в производстве метанола, диметилового эфира, моторного топлива и других химических продуктов. В связи с этим изучение процесса химической переработки древесины с получением синтез-газа и других химических продуктов из него является актуальной задачей.

Для решения этих задач сотрудниками кафедры Переработки древесных материалов Казанского национального исследовательского технологического университета была разработана эффективная технология переработки высоковлажных древесных отходов в высокооктановые компоненты моторного топлива с

полным автоматизированным управлением [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Технологическая схема представлена на рисунках 1, 2 и 3.

Сырье с высокой влажностью, поступающее в цех получения бензина со склада, предварительно проходит стадию быстрой сушки в сушилке, после чего подается в модуль загрузки сырья.

Для непрерывной работы установки термического катализа в модуле загрузки сырья установлен общий бункер 1, заполняемый древесными отходами.

Древесные отходы, в качестве которых берут технологическую щепу с фракцией частиц по длине до 35 мм и по толщине до 5 мм (по ГОСТ 15815), из общего бункера щепы 1 с помощью ленточно-скребкового транспортера 56 поступают в бункер загрузки 2, соединенный непосредственно с термореактором синтеза (далее - газогенератором) 3, что обеспечивает дозированную подачу древесной щепы в газогенератор (см. рис. 1). Включение конвейера 56 и шнека в бункере загрузки 2 осуществляется оператором вручную.

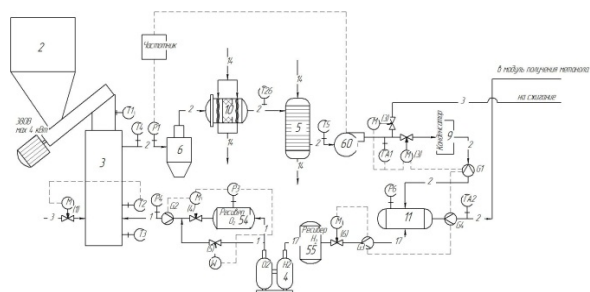


Рис. 1 – Технологическая схема производства компонентов моторного топлива из древесных отходов. Модуль получения синтез-газа

Процесс газификации в газогенераторе 3 осуществляется и поддерживается за счет подачи газифицирующего агента, в качестве которого применяется кислород, вырабатываемый

электролизером 4 из воды. Кислород из электролизера накапливается в ресивере кислорода 54, после чего его расход регулируется клапанами (4) и (5). Давление кислорода регулируется датчиками давления P3, P4, а расход – расходомером G2. Внутри газогенератора (в верхней части) установлен датчик температуры T1, целевая температура – 200°C. В средней части газогенератора установлен датчик температуры T2, в нижней – T3. При достижении температуры внутри газогенератора 1050°C, датчик T2 посылает сигнал на привод регулирующего клапана (1), который открывается для подачи водяного пара с целью снижения температуры внутри аппарата. При снижении температуры до 1000°C клапан закрывается. Водяной пар с температурой 110-150°C образуется в электрическом парогенераторе, работающем в автоматическом режиме. На выходном трубопроводе из газогенератора установлен датчик температуры T4 и датчик давления P1.

К выходному трубопроводу газогенератора подсоединен цилиндрический циклон 6, который обеспечивает очистку газов от крупных частиц золы и пыли.

Выход циклона соединен с фильтром - теплообменником 10 для более высокой степени очистки газов от мелких частиц и предварительного охлаждения, позволяющий улавливать частицы размерами до 5 мкм. Образованные в фильтре тонкой очистки 10, цилиндрическом циклоне 6 и, непосредственно, в газогенераторе 3 частицы золы, поступают в золосорбник, находящийся в нижней части газогенератора.

Далее очищенный газ от твердых примесей газ охлаждается с температуры 800 до 100 °C в кожухотрубном теплообменнике 5. Охлаждение смеси газов в кожухотрубном теплообменнике 5 осуществляется водой, подаваемой насосом 7 из бассейна 8. Газ поступает в трубное пространство теплообменника, а вода – в межтрубное. Для контроля температуры охлажденного газа на выходе из теплообменника 5 установлен датчик температуры T5.

На выходе из теплообменника установлена газодувка 60, создающая разрежение в системе. Она увеличивает обороты при разрежении меньше чем 300 мбар (регулируется датчиком P1 через частотный преобразователь). После газодувки стоит пробоотборник для газа ГА1. Пробы газа, постоянно поступают в газоанализатор, который при неудовлетворительном составе газа подает сигнал на отсечной клапан (3) для его закрытия. Газ отправляется на сжигание. При удовлетворительном составе газа газоанализатор подает сигнал на отсечной клапан (3') для его закрытия. Далее газ требуемого состава поступает в конденсатор 9, который осуществляет конденсацию водяных паров, содержащихся в газовом потоке.

Расход водорода из ресивера 55 контролируется расходомером G3, регулируется клапаном (6). Расход осушенного газа контролируется расходомером G1. Осушенный газ

смешивается с водородом в ресивере синтез-газа 11. Давление синтез-газа контролируется датчиком давления P6, расход – расходомером G4, состав – газоанализатором, в который газ постоянно поступает и пробоотборника ГА2.

Затем подготовленный синтез-газ подается в модуль получения метанола (см. рис. 2). Свежий синтез-газ поступает с избыточным давлением 0,68 – 0,82 МПа в компрессор 12. Давление на выходе из компрессора составляет 3,9-4,1 МПа. Сжатый газ смешивается в газовом эжекторе 11а с циркуляционным газом, поступающим из сепаратора 17, и с температурой не более 100 °C поступает в дожимной компрессор 12а, на выходе из которого газ имеет давление 5,6-6,0 МПа. Датчики P7 и T6 относятся к системе компримирования. Расход газа контролируется расходомером G5.

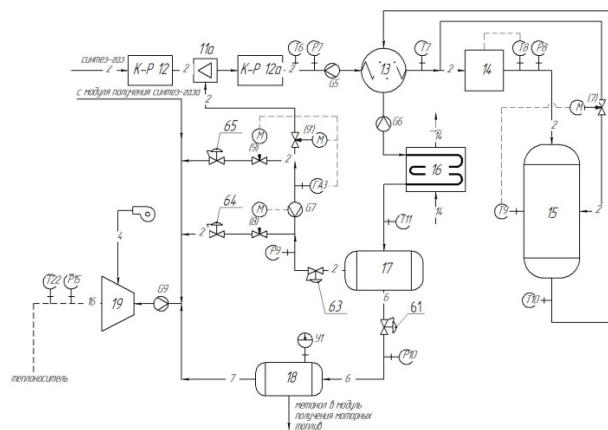


Рис. 2 – Технологическая схема производства компонентов моторного топлива из древесных отходов. Модуль получения метанола

Сжатый газ поступает в трубное пространство рекуперативного теплообменника 13. Газ в трубном пространстве 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 °C и контролируется датчиком T7.

Далее газ проходит электронагреватель 14, работающий преимущественно в пусковой период, а также в режиме поддержания оптимальной температуры газа. Электронагреватель представляет собой систему трубок и нагревательных лент, расположенных на цилиндрической обечайке. Температура нагрева лент регулируется датчиком температуры T8, находящимся на выходе из аппарата. При температуре выходящего газа 250 °C и выше датчик подает сигнал на реле отключения нагревательных лент от сети 380 В. При понижении температуры газа происходит включение нагревательных элементов. Давление газа контролируется датчиком P8.

До электронагревателя газ разделяется на два потока. Основной поток, пройдя электронагреватель, поступает в верхнюю часть реактора 15, вспомогательный охлаждающий поток

(байпас) подается в боковую часть реактора. Так как газ, проходя через катализатор в реакторе нагревается (экзотермическая реакция), то в каждом слое катализатора по ходу движения газа температура поднимается, и к средней части реактора достигает 300 °С. Для исключения возможности дальнейшего роста температуры в среднюю часть реактора подается охлаждающий газ (байпас), расход которого регулируется клапаном (7), который в свою очередь регулируется датчиком температуры Т9, установленным в средней части реактора. При температуре газа внутри реактора 300 °С и выше датчик Т9 подает сигнал на привод клапана (7), который плавно меняет положение открытия клапана до тех пор, пока температура газа не понизится до 265 °С. При достижении температуры газа 265 °С и ниже датчик Т9 подает сигнал на привод клапана для осуществления плавного закрытия. На выходе из реактора установлен датчик температуры Т10 для контроля температуры выходящего газа.

Из реактора газ выходит с температурой не более 300 °С и объемной долей метанола в этом газе 3,0-5,0%. Далее газ поступает в трубное пространство рекуперативного теплообменника 13, охлаждается до температуры не более 150 °С. Для контроля расхода выходящего газа установлен датчик G6 на выходе из теплообменника.

Затем охлажденный газ поступает в трубное пространство аппарата водяного охлаждения 16, где охлаждается до 40 °С потоком воды. Охлаждающая вода нагревается с 15 °С до 70 °С. Температура охлажденного газа на выходе из аппарата измеряется датчиком температуры Т11.

Конденсирующаяся смесь метанола и воды (метанол-сырец) поступает в сепаратор 17, где отделяется от циркуляционного газа, проходя сепарирующие устройства, и поступает в сборник метанола – сырца 18. Давление циркуляционного газа на выходе из сепаратора контролируется датчиком Р9. С целью исключения возможности накопления циркуляционного газа выше регламентируемой нормы датчик расхода G7, установленный на выходе из сепаратора, подает сигнал на привод регулируемого клапана (8) для сброса лишнего газа. При снижении расхода ниже заданного значения датчик посылает сигнал для закрытия клапана (8). Для контроля состава циркуляционного газа на выходе из сепаратора установлен пробоотборник ГАЗ, через который газ постоянно поступает в газоанализатор, который посылает сигнал на привод отсечного клапана (9') для его закрытия в случае, если концентрации компонентов газа не соответствуют требуемым значениям. Не соответствующий заданным параметрам циркуляционный газ отправляется на сжигание в котел-утилизатор 19.

Весь подпор давления в системе получения метанола обеспечивается регуляторами давления 65, 64 и 61, каждый из которых имеет свой заранее установленный диапазон регулирования.

Жидкий метанол-сырец из сепаратора 17 проходит регулятор давления 61 и поступает в

приемник метанола-сырца 18. Давление жидкого метанола контролируется датчиком давления Р10. В приемнике жидкость захватывает с собой часть циркуляционного газа из сепаратора, который в виде танковых газов выделяется из сборника метанола-сырца и отправляется на сжигание в котел-утилизатор 19. Уровень жидкого метанола-сырца в приемнике контролируется датчиком уровня У1.

Для запуска модуля получения моторного топлива необходим его предварительный прогрев (см. рис. 3).

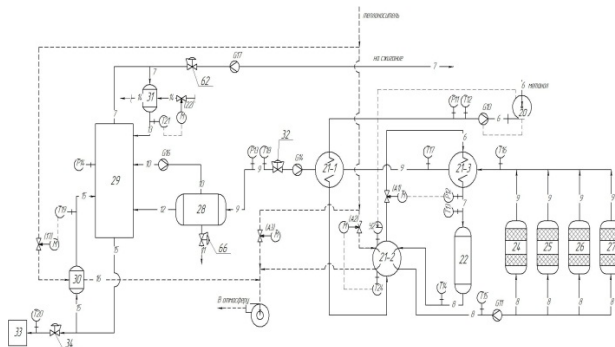


Рис. 3 – Технологическая схема производства компонентов моторного топлива из древесных отходов. Модуль получения моторного топлива

Для этого продукты сгорания газов, полученные в котле-утилизаторе с температурой 600-700 °С подаются через клапан (А2) в трубчатую систему испарителя метанола 21-2 и отводятся газодувкой 68. Одновременно с подачей теплоносителя в подогреватель метанола 21-1 и испаритель 21-2 подается жидкий метанол-сырец с помощью насоса 20 до определенного уровня, установленного в испарителе. По достижении верхнего уровня, датчик уровня У2 подает сигнал на привод насоса 20 для его отключения. Метанол начинает переходить в состояние насыщенного пара при закрытии клапана А1 на 96-98 % (его нормальное положение). Образующийся насыщенный пар метанола проходит через трубное пространство перегревателя 21-3, реактор ДМЭ 22, вторую трубную систему испарителя 21-2 и систему цеолитных реакторов 24-27, подогреватель, межтрубное пространство перегревателя, межтрубное пространство подогревателя и упирается в регулятор давления 32. Так как нагрев продолжается, давление в системе поднимается. При повышении давления в системе датчик Р12 посылает сигнал на клапан (А1) для его плавного открытия. Расход пара увеличивается, соответственно уровень жидкого метанола в испарителе падает. По достижении нижнего уровня в испарителе датчик У2 посылает сигнал на привод насоса 20 для его включения. По достижении заданной величины температуры датчик Т24, установленный в испарителе, посылает сигнал на клапан (А2) для его плавного закрытия. Дальнейший подогрев, испарение и перегрев метанола осуществляется за счет тепла углеводородов,

образующихся в системе цеолитных реакторов 24-27. Расход жидкого метанола регулируется датчиком расхода G10, который через частотный преобразователь регулирует обороты насоса 20.

После испарителя пары метанола проходят перегреватель 21-3, после чего с температурой температурой 310 °С и давлением 2,8 МПа, значения которых контролируются соответственно датчиками T13 и P12, установленными на выходе из перегревателя, направляется в химический реактор синтеза диметилового эфира 22, где на кислотном катализаторе превращается в равновесную смесь диметилэфира, непрореагировавшего метанола и воды.

Так как реакция образования диметилэфира из метанола экзотермичная, температура выходящей смеси повышается до 410 °С. Это значение контролируется датчиком температуры T14, установленном на выходе из реактора синтеза диметилового эфира.

Для снижения температуры реакционная смесь, выходящая из реактора, поступает во вторую трубчатую систему испарителя, где отдает свое вновь поступающему жидкому метанолу на его парообразование. Смесь охлаждается до температуры 185 °С. Для контроля расхода выходящей из второй трубчатой системы испарителя парогазовой смеси установлен датчик расхода G11, а для контроля температуры – датчик T15.

Далее парогазовая смесь разделяется на четыре потока и распределяется по четырем цеолитным реакторам синтеза углеводородов 24-27. Проходя через слой катализатора, оставшийся в смеси метанол образует углеводороды C₁-C₁₂ групп и воду через стадию образования диметилэфира, после чего, в результате ряда химических реакций при определенной объемной скорости, диметилэфир полностью реагирует с образованием углеводородов C₁-C₁₂ групп и воды. Температура выходящей смеси контролируется датчиком T16, установленном на линии сведения потоков.

Полученная смесь углеводородов и воды с повышенной в результате экзотермических реакций температурой до 370-375 °С, поступает в межтрубное пространство перегревателя где охлаждается за счет отдачи тепла перегреваемому метанолу. Из перегревателя 21-3 газовая смесь с температурой 170-180 °С, контролируемой датчиком T17, попадает в подогреватель 21-1, где охлаждается до температуры 121 °С, подогревая жидкий метанол. Расход углеводородных продуктов контролируется расходомером G14.

Далее смесь органических паров, частично сконденсированных углеводородов и воды, проходит регулятор давления 32, после которого давление смеси падает до 2,0 МПа, а температура до 40 °С. Давление после дросселирования контролируется датчиком P13, а температура – датчиком T18, причем. Давление в системе получения углеводородной смеси поддерживается подпором дросселя 32 и насосом 20.

Далее парогазовая смесь после прохождения через регулятор давления устройство 32 попадает в вертикальный сепаратор 28. Здесь происходит отделение сконденсировавшихся жидких углеводородных продуктов, воды и несконденсировавшегося газа. Газ от жидкости отделяется в каплеуловителе сепаратора. Вода и жидкие углеводородные продукты разделяются по плотностям в коалесцере сепаратора, причем вода отводится с нижней части сепаратора, а углеводороды со средней части. Фракции C₁-C₄ в газообразной фазе отводятся в верхнюю часть разгонной колонны 29. Их расход контролируется датчиком расхода G16. Жидкая фракция углеводородов C₅-C₁₂ поступает в нижнюю часть колонны. С частью углеводородов фракции C₁-C₄ за счет давления может уноситься фракция C₅-C₆, а с частью углеводородов фракции C₅-C₁₂ может уноситься фракция C₃-C₄, так как разделение в сепараторе происходит при температуре фазового перехода. Таким образом, паро-жидкостная смесь углеводородов C₁-C₁₁ двумя потоками поступает в массообменный аппарат – колонну очистки бензиновых фракций 29 от легких фракций C₁-C₄. Для отделения фракций C₁-C₄ жидкие продукты нагреваются до температуры кипения фракции C₅ в кипятильнике 30 продуктами сгорания из котла-утилизатора, в результате чего фракции C₅ также испаряются, поднимаясь в верхнюю часть колонны вместе с газообразными фракциями C₁-C₄. Температура продуктов сгорания 600-700 °С – контролируется датчиком T22, давление 0,05-0,1 МПа – контролируется датчиком P15. Температура углеводородов на выходе из кипятильника регулируется датчиком температуры T19, который подает сигнал на привод клапана (17) для его плавного открытия при превышении температуры, и плавного закрытия – при снижении. Теплоноситель отводится газодувкой 68.

Также в верхнюю часть колонны из сепаратора подается часть газообразных фракций. Газообразные фракции C₁-C₅ из верхней части колонны поступают в конденсатор 31, где охлаждаются до температуры конденсации фракций C₅, при которой фракции C₁-C₄ остаются в газообразном виде и уносятся из конденсатора как топливный газ, проходя регулятор давления 62. Сконденсировавшиеся фракции C₅ в виде флегмы возвращаются на верхнюю тарелку колонны и снова участвуют в массообменном процессе. Вода для охлаждения подается из бассейна 8. Температура конденсации регулируется датчиком температуры T21, который подает сигнал на привод клапана (22) для его плавного открытия при температуре выше установленной, и плавного закрытия – ниже. Оработанная вода возвращается в бассейн 8.

По мере накопления кубового остатка, представляющего собой фракции C₅-C₁₂ и являющиеся конечным продуктом – моторным топливом, производится отвод конечного продукта с нижней части колонны перед кипятильником, после чего углеводородная смесь проходит регулятор

давления 53, снижающий давление на выходе до 0,15-0,17 МПа и температуру до 60-65 °С, и поступает в приемник бензина 33. Температура моторного топлива измеряется датчиком Т20. Расход отходящего несконденсировавшегося газа контролируется датчиком расхода G17.

Общий расход сжигаемых газов контролируется датчиком G9, установленным перед котлом-утилизатором 19.

В бассейне 8 установлен датчик температуры Т25, который подает сигнал на привод клапана 23 для его плавного открытия при температуре внутри бассейна выше 15 °С.

При отклонении значения от заданного давления датчик Р15 подает сигнал через частотный преобразователь на привод газодувки 63 для регулирования его оборотов. При закрытии клапана (А2) открывается клапан (А3).

Все сигналы датчиков отражаются (дублируются) на пульте управления.

Вся запорно-регулирующая арматура имеет возможность ручного управления.

Представленная работа была проведена в рамках реализации Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013» и в ходе выполнения государственного контракта № 16.525.11.5008 по теме: «Создание технологии и опытной установки комплексной переработки

отходов лесной промышленности с получением теплоизоляционного материала».

По данной технологии был изготовлен опытный образец установки термического катализа с производительностью по исходному сырью 130 кг/час, по конечному продукту 24 л/ч компонентов моторного топлива. Образец размещен на опытно-экспериментальной базе Казанского национального исследовательского технологического университета.

Литература

1. Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, А.Р. Хисамеева, Д.А.Ахметова, А.Г. Мухаметзянова, *Вестник Казанского технологического университета*, **19**, 211-213 (2011)
2. Р.Г. Сафин, Н.Ф. Тимербаев, А.Р. Хисамеева, М.В. Шулаев, М.В. Хузеев, *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*, **11-12**, 63-70 (2011)
3. Р.Г. Сафин, Н.Ф. Тимербаев, А.Р. Хисамеева, Д.А. Ахметова, *Вестник Казанского технологического университета*, **17**, 195-199 (2012)
4. Р.Г. Сафин, Н.Ф.Тимербаев, З.Г.Саттарова, Т.Х.Галеев, *Вестник Казанского технологического университета*, **11**, 205-207 (2012)
5. Н.Ф.Тимербаев, Р.Г.Сафин, Т.Х.Галеев, *Вестник Казанского технологического университета*, **3**, 165-170 (2013)
6. Пат. РФ 2478604 (2013).

Р. Г. Сафин - д-р техн. наук, проф., зав. каф. переработки древесных материалов КНИТУ, safin_rg@kstu.ru; **Н. Ф. Тимербаев** - д-р техн. наук, проф. той же кафедры; **А. Р. Садрtdинов** - канд. техн. наук, доц той же кафедры; **Д. Б. Просвириков** – асп. той же кафедры, prosvirnikov_dmi@mail.ru.