

Россия имеет огромные возможности для интенсивного развития практически всех современных направлений использования биомассы в энергетике [1]. А отходы биомассы как источник энергии выступают в качестве «моста в будущее», обеспечивая плавный переход от топливной энергетики к другим, принципиально новым, видам энергии. Тем не менее, до сих пор востребован и сам генераторный газ и актуально его применение в качестве промежуточного звена, например, в химической промышленности. С целью его получения можно использовать для сжигания любые древесные отходы. От того, в каком виде будет использоваться биотопливо, зависит эффективность его горения и стоимость энергии, которая вырабатывается с его помощью. Одним из известных и достаточно эффективных способов получения газа из биомассы является процесс газификации. Газификация - это высокотемпературный термохимический процесс взаимодействия органической массы с газифицирующим агентом, в результате которого образуется смесь различных газов (генераторный газ). Знание факторов, влияющих на процесс газификации, и управление их параметрами позволяет оптимизировать процесс выхода синтез-газа с максимальным содержанием горючих компонентов [2]. Проблема эффективной термической переработки отходов лесозаготовки и деревообработки в энергетический газ заключается в острой необходимости разработки оптимальной техники и технологии газификации древесины. Из многих существующих технологических схем энергохимического использования древесины в нашей стране распространение получили две: - схема частичной газификации (термолиз) древесины в топках-генераторах системы ЦКТИ В. В. Померанцева [3]; - схема полной газификации в газогенераторных установках. Первая схема применялась на крупных лесопромышленных предприятиях, имеющих собственную энергетическую базу в виде электростанции мощностью 1500 кВт или сравнительно большой теплоснабжающей котельной. Преимущество ее состояло в большом энергетическом потенциале и возможности попутного снабжения населения бытовым газом. Вторая схема при определенных условиях эффективна для небольших лесопромышленных предприятий, основной целью которых является производство химических продуктов, а генераторный газ при этом может использоваться как топливо в небольших котлах или двигателях внутреннего сгорания. В области газификации Россия имеет определенные реальные успехи в создании современного оборудования для газификации твердой биомассы (например, древесины). Наиболее надежный метод для исследования газификации твердого топлива и решения различных задач при проведении данного процесса - теоретический метод расчета, основанный на составлении и решении дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса. При газификации можно выделить следующие основные стадии: прогрев, сушку, пиролиз, сгорание продуктов пиролиза и стадию восстановительных процессов образования

генераторного газа. Представленная ниже математическая модель описывает эти стадии и учитывает взаимосвязь между ними. Процесс сушки высоковлажных древесных отходов можно описать дифференциальным уравнением тепломассопереноса, которое для одномерной симметричной пластины можно записать в виде: (1) (2) где  $k_p$  - коэффициент молярного переноса материала;  $c$  - теплоёмкость материала;  $\alpha_t$  - коэффициент температуропроводности. При нахождении частиц древесины в одинаковых условиях и идеальном перемешивании компонентов пара, находящегося над поверхностью влажного материала, дифференциальное уравнение изменения парциального давления пара можно описать соотношением: (3) Изменение температуры пара можно выразить в виде следующего дифференциального уравнения: (4) Совместное решение уравнений переноса в паровой фазе (3) и (4) и во влажном материале (1) и (2) и граничных условиях (5) (6) полностью описывает процесс сушки древесных частиц. Частица, достигнув 200 °С, начинает термически разлагаться (начало процесса пиролиза), что сопровождается образованием парогазовой смеси и убылью массы. Для определения изменения температуры материала по слоям, становится необходимым определить изменение влажности материала в данных слоях. Считаем, что изменение влажности слоя материала определяется изменением влажности частицы входящей в данный слой. В результате для описания изменения влажности частицы при высокотемпературном подводе тепла введена система дифференциальных уравнений тепло- и массопроводности: (7) (8) где  $\lambda$  - теплопроводность частицы. Для решения вышеуказанных дифференциальных уравнений сформулированы начальные условия, записанные в виде (9) , , и граничные условия в виде (10) При достижении частицей абсолютно сухого состояния уравнение (7) исключается из расчета, а изменение температуры частицы рассчитывается только по уравнению (8). Процесс пиролиза древесины можно рассматривать как совокупность процессов термического разложения ее основных компонентов: гемицеллюлозы, целлюлозы и лигнина. Изменение массы в единице объема исходной древесины для каждого из указанных компонентов, запишется в следующем виде [4] для гемицеллюлозы: (11) (12) для целлюлозы: (13) для лигнина: (14) где  $\gamma$  - доля компонента;  $m$  - удельная масса вещества, кг/м<sup>3</sup>;  $k$  - константы скорости химических реакций. Изменение удельной массы образующегося угля определяется по уравнению (15) Изменение массы газовой фазы в единице объема древесной частицы представлена как сумма массовых потоков за счет конвекции и реакций пиролиза (16) Давление газа определяется из уравнения состояния идеальных газов (17) где  $M_g$  и  $R$  - молекулярный вес, г/моль, и универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К), соответственно. Химические процессы образования угля и газов сопровождаются выделением или поглощением тепла, что оказывает значительное влияние на изменение

температуры частицы и слоя в целом. Предполагаем, что при пиролизе температура частицы будет равна температуре образующихся газов, а в локальном объеме между компонентами газовой и твердой фазы установлено термодинамическое равновесие. Тогда температура частицы будет определяться температурой газового потока, а уравнение сохранения энергии запишется в виде: (18) (19) где  $\lambda_{\text{ч}}$  – коэффициент теплопроводности частицы, кВт/(м•К);  $q$  – удельная теплота химической реакции, кДж/кг. Начальные условия для решения уравнений (11-16) и (18) запишутся следующим образом: а граничные условия для уравнения (18) запишутся аналогично (10). По окончании расчета зоны пиролиза определяется время протекания процесса. Зная скорость продвижения материала, рассчитывается высота зоны пиролиза ( $h_{\text{с}} = t \cdot w_{\text{м}}$ ). При моделировании химических превращений, протекающих при пиролизе древесных отходов, необходимо провести экспериментальные исследования по определению зависимостей состава пиролизного газа, выхода угля и содержания в нем углерода от температуры процесса пиролиза. Согласно данной математической модели и принятых в ней допущений в зоне горения протекают только гомогенные реакции взаимодействия продуктов пиролиза CO, H<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> с окислителем (воздухом) [5]. В процессе расчета определяются теоретически необходимый расход воздуха  $G_{\text{в}}$  (20), температура горения смеси газов  $T_{\text{г}}$  (23) и выход продуктов горения  $V_{\text{г}}$  (21). (20) где  $G_{\text{п.г}}$  – расход пиролизного газа, м<sup>3</sup>/с. Объем продуктов сгорания определяется как сумма объемов отдельных компонентов:  $V_{\text{г}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2}$ , (21) где  $V_{\text{CO}_2}$  и  $V_{\text{H}_2\text{O}}$  определяются из соответствующих реакций образования данных веществ, а остальные по выражениям  $V_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot L_0$ ,  $V_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot L_0 + N_2$ . Теплотворность горючей смеси (Дж/м<sup>3</sup>) определяется по эмпирической формуле [6]: (22) Температура смеси газов в зоне горения вычисляется по формуле: (23) Высота зоны горения определяется по формуле , где  $d_2$  – диаметр реактора. При рассмотрении зоны восстановления диффузионные потоки тепла и массы пренебрежимо малы по сравнению с конвективным переносом тепла и массы [6], поэтому, пренебрегая влиянием диффузии и теплопроводности, стадию восстановления можно описать [7]: - уравнением материального баланса для газового потока: (24) и уравнением материального баланса для угля: (25) Уравнение сохранения энергии для угля запишется в виде: (26) а для газового потока: (27) Для решения системы уравнений (24-27) приняты следующие граничные условия: по температуре: по массе: Скорость газового потока в восстановительной зоне определяется по закону Дарси: (28) Подтверждение данных математического моделирования происходит рядом экспериментальных исследований, которые проводились на пилотной установке. Прототипом данной установки является запатентованный газогенератор для газификации влажного топлива [8]. Результаты представлены в виде графических зависимостей [6]. Установлено, что при увеличении влажности древесных отходов максимальная

температура в зоне горения снижается. Это приводит к снижению скорости химических реакций и качества генераторного газа, а именно, увеличивается количество образующихся углекислого газа и водяного пара, уменьшается содержание CO и H<sub>2</sub> (рис.1). Также, с увеличением влажности древесных отходов уменьшается и теплотворная способность генераторного газа (рис.2). Поэтому на оптимальный режим работы газогенератора влияет правильный выбор параметров газификации, таких как расход окислителя в зоне горения и высота зоны восстановления. Рис. 1 - Зависимость состава генераторного газа от влажности отходов: 1 – CH<sub>4</sub>; 2 – CO; 3 – CO<sub>2</sub>; 4 – H<sub>2</sub> Рис. 2 - Зависимость теплоты сгорания генераторного газа от влажности газифицируемых отходов Рис. 3 - Зависимость состава генераторного газа от расхода окислителя в зоне горения газификатора: 1 – CH<sub>4</sub>; 2 – CO<sub>2</sub>; 3 – CO; 4 – H<sub>2</sub> Как показывают опытные данные (рис. 3), интенсивность процесса газификации также влияет на состав и теплотворную способность генераторного газа. Так, интенсификация процесса путем увеличения расхода окислителя приводит к росту образования горючих компонентов CO и H<sub>2</sub> и уменьшению количества невосстановившегося CO<sub>2</sub>, что объясняется смещением константы равновесия эндотермических реакций восстановления CO<sub>2</sub> и разложения воды в сторону увеличения содержания в генераторном газе CO и H<sub>2</sub>, связанного, как отмечалось, с увеличением температуры и скорости химических реакций в зонах горения и восстановления. В результате теплотворная способность генераторного газа также повышается (рис. 4). Кроме того, повышение температуры в зонах горения и восстановления ведет к практически полному разложению образующихся смол, что улучшает качество генераторного газа, однако при этом возрастает количество уносимой пыли и гидравлическое сопротивление газогенератора. Рис. 4 - Зависимость теплоты сгорания генераторного газа от расхода окислителя в зоне горения газификатора Таким образом, в ходе экспериментальных исследований были определены оптимальные параметры процесса газификации, значительно влияющие на химический состав и теплотворную способность получаемого генераторного газа. В зависимости от свойств топлива и назначения газа газификация производится в различных по схеме и устройству газогенераторах [5, 9]. При использовании в качестве сырья отходов деревообработки влажностью более 40 % рекомендуется газогенератор [8], состоящий из бункера с узлом загрузки, дополнительными нагревательными элементами и с определенным способом подачи воздуха. Узел загрузки изготовлен таким образом, чтобы сырье могло подаваться непрерывно, причем полностью исключено попадание воздуха в газификатор. Предварительная сушка отходов деревообработки происходит в образовавшемся межкольецевом пространстве при кондуктивном подводе тепла. На завершающей стадии производства, на стадии восстановления для повышения калорийности конечного продукта предусмотрен ввод увлажненного окислителя.