

Одной из актуальных проблем современного мира является поиск возобновляемых источников энергии, которые могли бы составить достойную конкуренцию нефтяному топливу и природному газу, мировые запасы которых постепенно истощаются, а цены непрерывно растут. Одним из таких источников можно рассматривать биомассу. Основную долю биомассы как топлива составляет древесина, весомым достоинством которой 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 ресурс. На сегодняшний день биомасса - это четвертое по значению топливо в мире. Она обеспечивает до 15 % общемирового производства энергии и является самым динамично развивающимся сектором энергетики стран ЕС, США и Канады [1]. На предприятиях лесопромышленного комплекса ежегодно образуются миллионы тонн древесных отходов. Основным способом их утилизации на сегодняшний день - прямое сжигание с получением тепловой энергии. Перспективен и более эффективен метод 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. Основным промышленным способом получения синтез-газа является паровая конверсия метана. Однако проведенные аналитические исследования показали, что генераторный газ, по составу максимально приближенный к синтез-газу, можно получить паровой конверсией древесного угля, осуществляемой через стадию пиролиза древесных отходов с последующей газификацией полученного древесного угля. Данное направление мало изучено, промышленных установок паровой конверсии древесного угля не существует. В связи с этим изучение процесса паровой конверсии древесного угля и разработка технологии получения генераторного газа, пригодного для синтеза новых продуктов, является актуальной задачей. В связи с этим авторами разработана и создана экспериментальная установка для исследования процессов, протекающих при паровой конверсии древесного угля, внешний вид которой представлен на рис. 1 [3]. Экспериментальный стенд состоит из реактора паровой конверсии древесного угля, парогенератора, нагревателя газов, газоанализатора и системы контроля параметров процесса. Рис. 1 - Экспериментальный стенд для исследования процессов протекающих в восстановительной зоне реактора: 1 - газоанализатор; 2 - парогенератор; 3 - реактор; 4 - термопары; 5 - нагреватель газов. Процессы, протекающие при паровой конверсии древесного угля, чрезвычайно сложны и многообразны и зависят как от фракционного состава перерабатываемых древесных отходов,

так и от режимных параметров процесса переработки. Для изучения вопроса влияния породы используемых древесных отходов на выход основных компонентов синтез-газа, а именно CO и H₂ проведена серия экспериментов, результаты которых представлены рис. 2 и 3. В качестве образцов использовался древесный уголь, полученный из березы, дуба и сосны. Рис. 2 - Зависимость образования CO от породы используемых древесных отходов. Анализ полученных кривых показывает, что порода используемых древесных отходов практически не влияет на количество CO и H₂, образующихся в процессе паровой конверсии. Рис. 3 - Зависимость образования H₂ от породы используемых древесных отходов.

Взаимодействие водяного пара с древесным углем

По характеру температурных режимов протекающих реакций, реактор паровой конверсии древесного угля разделим условно на 3 участка [2]. На первом участке перегретый до 1000 °C водяной пар подается на поверхность раскаленного до 900 °C древесного угля. При контакте водяного пара с нагретым слоем древесного угля под действием высокой температуры (950 °C и выше) протекает следующая реакция: $C + H_2O_{пар} = CO + H_2 - 118,8 \text{ кДж}$. 1.1 Поскольку реакция эндотермическая, происходит понижение температуры. При температуре от 900 до 950 °C протекает реакция: $C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2 - 75,2 \text{ кДж}$. 1.2 Обе реакции эндотермичны и приводят к понижению температуры. На втором участке наблюдается снижение скорости прохождения водяного пара через древесный уголь за счет сопротивления слоя. Образованный ранее CO вступает в реакцию с парами воды, в результате чего образуется углекислый газ и водород: $CO + H_2O = CO_2 + H_2 + 43,6 \text{ кДж}$. 1.3 Также на этом участке начинает протекать реакция восстановления углекислого газа: $C + CO_2 = 2CO - 162,4 \text{ кДж}$. 1.4 Подробнее эту реакцию рассмотрим ниже. На третьем участке водород, образованный в реакциях (1.1) - (1.3) взаимодействует с углем, образуя метан: $C + 2H_2 = CH_4 + 87,4 \text{ кДж}$; 1.5 $CO + 3H_2 = CH_4 + H_2O + 206,2 \text{ кДж}$. 1.6 Температура в данной зоне порядка 800-850 °C. Содержание метана в газе, полученном из древесного угля, не превышает 1% . Также для обеспечения условий протекания данных реакций можно использовать катализаторы, повышающие выход CO и H₂ за счет понижения температуры реакции 600-700 °C. Скорость протекания реакции (1.4) в два раза быстрее скорости протекания реакции (1.1). Лимитирует реакционную зону наличие твердого углерода. Для более полного описания восстановительных процессов, рассмотрим их на примере взаимодействия угольной частицы с парами воды и другими газами. Взаимодействие угольной частицы с водяным паром происходит следующим образом. На раскаленную поверхность угольной частицы подается водяной пар. Глубину взаимодействия паров воды с углеродной частицей назовем Δh. На поверхности частицы начинают протекать следующие реакции: $C + H_2O = CO + H_2$, $C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2$. Пары воды диффундируют на глубину Δh, обозначенную пунктирной линией, и в результате протекающих реакций образуются CO, H₂, CO₂. Продукты

реакции выходят из пористой частицы путем диффузии, а также с массовым потоком газа, который возникает в результате гетерогенных реакций углерода с реакционными газами. Образованные ранее продукты реакций (CO, H₂, CO₂) далее взаимодействуют в газовой фазе с парами воды, углеродом и между собой по реакциям: $CO + H_2O = CO_2 + H_2$, $CO + 3H_2 = CH_4 + H_2O$, $C + 2H_2 = CH_4$, $C + CO_2 = 2CO$. По мере протекания данных химических реакций происходит убывание слоя вследствие реагирования частиц угля. Из вышеуказанного следует, что основным фактором, влияющем на компонентный и количественный состав образующегося в реакторе генераторного газа, является температура процесса. В связи с этим были проведены исследования по определению зависимости образования H₂, CO, CO₂ при взаимодействии водяного пара с древесным углем при разных температурах процесса (рис. 3). А в табл. 1 представлена цифровое значение полученных результатов. Таблица 1 - Взаимодействие древесного угля с водяным паром

Температура, °C	Объемный состав газа, %	H ₂	CO	CO ₂	H ₂ O
674	758	838	861	954	1000
8,41	22,80	32,77	36,48	44,43	48,84
0,063	2,67	7,96	11,01	32,70	46,31
3,84	9,23	12,11	13,13	5,66	1,25
87,12	65,82	47,15	39,18	17,21	3,68

Рис. 3 - Зависимость реагирования водяного пара с древесным углем и выход H₂, CO, CO₂ от температуры процесса. Как видно из рис. 3 и табл. 1 увеличение температуры положительно влияет на количество и качество образующегося генераторного газа. Наиболее приемлемый для ведения процесса паровой конверсии древесного угля температурный режим составляет от 950 °C и выше. При данных температурах в генераторном газе содержится максимальное количество CO и H₂. Варьируя температуру ведения процесса, можно получать генераторный газ требуемого состава, пригодного для синтеза из него новых продуктов химической промышленности. Выводы. Таким образом, в данной статье приведены результаты исследований по влиянию породного состава древесных отходов и температуры на процесс паровой конверсии древесного угля. По результатам проведенных экспериментальных исследований выявлено что: - природа используемых древесных отходов практически не влияет на состав получаемого генераторного газа; - для получения генераторного газа, пригодного для синтеза новых продуктов, целесообразно проводить паровую конверсию древесного угля рабочей температуры 950-1000°C