

Согласно энергетической стратегии до 2030 года Россия не останется в стороне от развития возобновляемых источников энергии. Имеющийся в стране потенциал и научно-технические разработки в этой сфере, наряду с развитием международного сотрудничества, станут основой поэтапного увеличения вклада России в развитие рынка возобновляемых источников энергии. Также, необходимо отметить, что в планы Правительства РФ входит создание условий для расширения производства электрической и тепловой энергии на основе возобновляемых источников энергии [1]. Низкокачественная древесина и отходы деревообработки являются одними из основных возобновляемых источников энергии для нашей страны. Ежегодное количество отходов только деревообрабатывающих предприятий России составляет более 70 млн. м³ [2]. Наиболее привлекательным решением для интеграции данного вида ресурсов в существующую структуру ТЭК является технология быстрого пиролиза, которая позволяет переработать низкокачественную древесину и отходы деревообработки в бионефть (до 70%), углистый остаток и газ. Бионефть может быть использована в качестве топлива и химического сырья во многих отраслях промышленности [3,4,5,6,7]. В данной технологии высокий выход жидких продуктов обеспечивается за счет скоростного нагрева сырья и снижения продолжительности пребывания продуктов термического разложения в зоне реакции. Данное обстоятельство приводит к минимизации вторичных реакций и, преимущественно, к термической деполимеризации высокомолекулярных соединений [8,9]. В промышленности, для обеспечения высокоинтенсивных режимов нагрева, в основном используют кондуктивный подвод тепла сырью от нагретых сред с более высокой теплоемкостью и снижают размер перерабатываемых частиц [10,11]. Для обеспечения высокоинтенсивных режимов нагрева и минимизации вторичных реакций прибегают к следующим основным методам при термическом разложении. Используют реакторы кипящего слоя, циркулирующего кипящего слоя, конусные, вакуумные, вихревые пиролизные реакторы, а так же различные виды абляционных реакторов [11,12]. Для экспериментального исследования процесса хорошо себя зарекомендовали реакторы с нагреваемыми элементами в виде специальных проволок и сеток - сетчатые реакторы [13]. Для экспериментального исследования процесса термического разложения материалов был создан стенд на базе сетчатого реактора, схема которого представлены на рис. 1. Рис. 2 - Схема экспериментального стенда для исследования для исследования термического разложения материалов Экспериментальный стенд для исследования термического разложения материалов включает в себя: реакционную камеру 5, систему нагрева образца, систему управления и регистрации данных, два конденсатора 11 и 12, газгольдер 2, баллон с инертным газом 1. Реакционная камера 5 теплоизолирована и снабжена нагревательным элементом, который подключён к терморегулятору 4 для обеспечения заданной температуры.

Реакционная камера 5 содержит в нижней части патрубок для отвода парогазовой смеси, сообщающийся последовательно с конденсатором первой ступени 12, конденсатором второй ступени 11 и газгольдером 2. В верхней части реакционной камеры 5 расположен патрубок для подвода инертного газа, который сообщается трубопроводом через ротаметр 6 и понижающий редуктор с баллоном 1. Герметизация реакционной камеры 5 осуществляется крышкой (рис. 2, 3), которая включает в себя два электрода, между которыми располагается нагревательный элемент, выполненной в виде металлической сетки из жаропрочной стали с размером ячеек 0,16x0,16 мм. Нагрев сетки осуществляется за счёт подачи на электроды напряжения через трансформатор 7. Сила тока регулируется в зависимости от необходимой скорости нагрева и температуры нагревательного элемента, и варьируется от 60 до 250 А. Рис. 2 - Общий вид крышки реакционной камеры Рис. 3 - Общий вид реакционной камеры

Зависимость скорости нагрева и конечной температуры термического разложения от силы тока имеет линейную характеристику и представлена на рис. 4. Рис. 4 - Зависимость скорости нагрева и конечной температуры термического разложения от силы тока

Конденсаторы 11 и 12 состоят из двух последовательно соединённых теплообменников типа «труба в трубе» со сборниками конденсата. Конденсаторы последовательно соединены трубным пространством с реакционной камерой 5. Охлаждающая рубашка конденсатора первой ступени 12 соединена с циркуляционной линией термостата 16, температура которой фиксируется в диапазоне от 20 до 150°C. Охлаждающая рубашка конденсатора второй ступени 11 соединена с линией циркуляции воды, температурой 20°C. Сборники конденсата представляют собой герметичную съёмную ёмкость цилиндрической формы, снабжённую радиальным патрубком отвода газов. Последний сборник конденсата соединён гибким трубопроводом с газгольдером 2. Газгольдер 2 представляет собой герметичную камеру без дна, закреплённую внутри жёсткой оболочки. Внутреннее пространство камеры сообщается патрубком через запорно-регулирующую арматуру с патрубком отвода газов конденсатора и штуцером для отбора проб. Также внутреннее пространство камеры снабжено патрубком вакуумирования, который соединён с вакуумным насосом 3. В рабочем состоянии оболочка заполняется водой выше уровня дна камеры для обеспечения гидрозатвора. Благодаря созданию разряжения с помощью вакуумного насоса 3 достигается изменение уровня жидкости внутри камеры. Причём, уровень воды во внутренней камере выше, чем во внешней оболочке. Таким образом, в ходе эксперимента, за счёт втягивания образовавшегося пиролизного газа происходит изменение уровня жидкости в камере. Причём объём выделившегося пиролизного газа соответствует объёму вытесненной воды, которая, по окончании эксперимента, переливается в ёмкость 17 и взвешивается на весах 13. Система управления и регистрации данных позволяет управлять температурой процесса и

осуществлять фиксацию мгновенных значений температуры нагревающего элемента и температурных полей. Система управления и регистрации данных включает в себя: аналогово-цифровой преобразователь (АЦП)8, компьютер 9 со специальным программным обеспечением, термоэлектрические преобразователи типа хромель-алюмель, ТРМ 4. Фиксация экспериментальных данных осуществляется в дискретном режиме с помощью АЦП 8, который работает под управлением программного обеспечения компьютера 9. Дальнейшая обработка сохранённых экспериментальных данных позволяет сделать вывод об изменении режимных параметров процесса во времени. Фиксация температуры осуществляется термопарами, подключёнными к аналоговому входу АЦП 8. Экспериментальные исследования процесса термического разложения осуществляются следующим образом: Предварительно подготовленные модельные образцы располагаются на сетчатом нагревательном элементе и герметизируются крышкой в камере пиролиза 5. Далее, осуществляется прогрев реакционной камеры 5 с помощью нагревателя до достижения заданной температуры. После прогрева и герметизации реакционной камеры осуществляется её продувка инертным газом из баллона 1 с заданным расходом. Эксперимент начинается после включения трансформатора 7, при этом осуществляется резкий подъём температуры на сетчатом нагревательном элементе. Температурная кривая и кривая мгновенной скорости нагрева сетчатого нагревательного элемента при силе тока 250А представлена на рис 5. Как видно из представленных зависимостей, в первые 10 с эксперимента наблюдается линейный подъём температуры до 550 0С с последующей стабилизацией. Полученные продукты термического разложения: пиролизная жидкость, уголь и газ подвергаются дальнейшему анализу и взвешиванию для определения параметров и материального баланса процесса. Эксперимент заканчивается после стабилизации температуры нагревательного элемента и прекращении выделения парогазовой смеси. Необходимо добавить, что разработанный экспериментальный стенд позволяет обеспечить двухстадийную конденсацию продуктов термического разложения. На рис. 6 представлен материальный баланс в виде зависимостей выходов продуктов термического разложения древесины березы при средней скорости нагрева 30 0С/с от температуры хладагента конденсатора первой ступени. Как видно из представленных зависимостей, с повышением температуры хладагента конденсатора первой ступени с 50 до 150 0С выход с нее конденсата снижается с 30 до 3%, а количество конденсата на второй ступени увеличивается с 7 до 36% соответственно. Рис. 5 - Температурная кривая и кривая мгновенной скорости нагрева сетчатого нагревательного элемента при силе тока 250А Следует отметить, что до 40 % от общей массы сырья представляет собой величина невязки, которая, по-видимому, связана с тем, что одна часть парогазовой смеси конденсируется в самом реакторе не успевая достигнуть конденсатора, а другая

уходит вместе с неконденсируемыми газами в газгольдер. В ректоре мгновенно конденсируются и не доходят до конденсатора смолы, температура насыщения которых выше 200 °C. В газгольдер пролетает жидкость в виде смоляного тумана, для улавливания которой требуется усовершенствование системы конденсации. Рис. 6 - Материальный баланс при термическом разложении в зависимости от температуры конденсации. Таким образом разработанная экспериментальная установка позволяет обеспечить исследование процесса быстрого пиролиза при скоростях нагрева до 30 °C/с.