

Исследования по пиролизу древесины на кафедре переработки древесных материалов (ПДМ) начаты в начале 2004 г. [1÷3]. Целью исследования была оптимальная переработка отходов деревообработки в древесный уголь. В результате была создана углевыжигательная печь [4] (см. рис. 1), на который было показано, что пиролизная переработка позволяет не только получить ценные продукты из древесных отходов, но и утилизировать древесные отходы, включающие в себя токсичные вещества [5]. В частности, большой проблемой является утилизация отработанных деревянных шпал ежегодно образующихся в количестве более 2 млн. штук. Разработанная на кафедре ПДМ технология утилизации отработанных деревянных шпал [6÷8] позволяет предотвратить загрязнению окружающей среды, т.к. процесс пиролиза осуществляется в герметичных условиях. Кроме того она позволяет получить экономическую выгоду за счет использования тепла сжигания образующихся пирогазов и реализации жидких и твердых продуктов пиролиза. Рис. 1 - Стационарная установка для термической переработки древесных отходов (Пат. №2256686): 1 - камера пиролиза, 2 - контейнер, 3 - газогенератор, 4 - камера сгорания, 5 - конденсатор, 6 - сборник конденсата, 7 - воздуходувка, 8 - камера сушки, 9 - теплоизоляция, 10 - перфорированный коллектор, 11 - газоход топки, 12 - шнековый питатель, 13 - калорифер. При этом, вопрос сепарации жидких продуктов пиролиза занимает особое место, т.к. при прохождении пирогазов они частично могут сконденсироваться с последующей полимеризацией во внутренней поверхности трубопроводах. Для предотвращения указанных явлений установка пиролиза должна иметь хорошую теплоизоляцию и специальную конструкцию конденсатора. Для сепарации из пиролизных жидких продуктов пиролиза целесообразно использование конденсаторов смешения эжекционного типа (см. рис. 2), впервые апробированная на КХК (ОАО «Нэфис-Косметик») при газоочистке в установке для извлечения жирных кислот из соапстока [9]. Рис. 2 - Схема промышленной установки для утилизации ОДШ: 1 - установка механической очистки; 2 - рубительная машина; 3 - транспортер; 4 - сушилка; 5 - камера пиролиза; 6 - конденсатор смешения эжекционного типа; 7 - камера активации; 8 - топка; 9 - баллон с газом; 10 - газгольдер; 11 - компрессор. Соотношение твердых (древесный уголь) и жидких (жижка) продуктов пиролиза зависит от режимов организации процесса пиролиза, от скорости подвода тепла. При быстром (абляционном) пиролизе доля жижки увеличивается до 80 % от исходной массы. Вследствие высокой энергетической ёмкости жидких продуктов пиролиза и возможности их использования в качестве жидкого топлива и химического сырья это направление переработки древесных отходов наиболее динамично развивается во многих странах мира. Кондуктивный подвод тепловой энергии к сырью позволяет провести разложение древесины в интенсивном режиме и при незначительном времени пребывания продуктов разложения в реакционной зоне [10÷14] и обеспечить высокий выход жидких продуктов.

Сокращение времени пребывания древесных материалов и продуктов пиролиза в зоне реакции можно достигнуть также за счет уменьшения размера перерабатываемого сырья и организации процесса термического разложения древесины в кипящем слое [15]. Пиролиз древесины включает в себя ряд взаимосвязанных процессов нагрева, сушки, термической деструкции высокомолекулярных соединений, состоящих из множества параллельно протекающих элементарных взаимодействий. При этом вначале протекают эндотермические процессы со значительным потреблением тепловой энергии, а затем - экзотермические процессы: экзотермические реакции, процессы конденсации, охлаждения продуктов реакций. В связи с этим на кафедре ПДМ ведутся разработки технологий и аппаратных оформлений установок пирогазетической переработки древесины с максимальной рекуперацией тепловой энергии [16÷25]. Для рекуперации тепловой энергии в разработанных установках [26,27] использованы тепловые насосы, рекуперативные теплообменники. При переработке древесных отходов в виде щепы рекомендуется установка шахтного типа [27] (рис. 3), в которой с помощью теплового насоса, тепло передается из зоны охлаждения древесного угля в зону нагрева технологической щепы. Рис. 3 - Пирогазетическая установка шахтного типа Установка для производства древесного угля включает вертикальную реторту непрерывного действия 1, имеющую зону сушки 2, зону пиролиза 3, зону охлаждения 4, зону накопления 5; патрубок 6 вывода пиролизных газов; патрубок 7 подачи топочных газов в зону сушки; дозирующий выгрузчик угля 8 с непрерывной выгрузкой; топку 9; дымовую трубу 10; эжектор 11, соединенный всасывающим трубопроводом с вертикальной ретортой 1, подающим трубопроводом с разделительным аппаратом 12 и нагнетающим трубопроводом с зоной накопления жидкости 13 через насос 14 для циркуляции жидкости; дозирующий загрузчик технологического сырья 15 с непрерывной загрузкой; конденсатор 16; рекуперативный теплообменник 17; эжектор неконденсирующихся газов 18; воздухоподувку 19; дымосос 20; регулятор температуры топочных газов 21, подаваемых в зону сушки 2; регулятор температуры жидкости 22. Зона накопления 5 снабжена патрубками подвода 23 и отвода 24 воздуха. Зоны сушки 2, пиролиза 3, охлаждения 4 и накопления 5 изолированы барабанными питателями 25, 26, 27, при этом верхняя часть зоны пиролиза 3 и верхняя часть зоны охлаждения 4 вертикальной реторты 1 сообщены между собой тепловой трубой 28, а зона сушки 2 и зона охлаждения 4 сообщены между собой через конденсатор 16. Пирогазетическая установка работает следующим образом. Через дозирующее устройство 15 технологическое сырье (древесную биомассу) подают в зону сушки 2 вертикальной реторты 1, где его сушат и прогревают до 200°C, за счет подачи топочных газов через патрубок 7. Затем топочные газы в виде парогазовой смеси удаляют из зоны сушки 2 в конденсатор 16, при этом температура

отводящихся топочных газов поддерживается в пределах 100°C. Из зоны сушки 2 через барабанный питатель 25 древесные отходы поступают в зону пиролиза 3, где температура сырья возрастает до 350°C за счет тепловой трубы 28 и конвективных потоков пиролизного газа, а затем до 500°C за счет тепла, выделяющегося в процессе экзотермических реакций. В зоне пиролиза 3 происходит выделение пирогазов и образование угля. Для отвода образовавшихся пирогазов из зоны пиролиза 3 в разделительном аппарате 12 используют жижку, которую из зоны накопления жижки 13 нагнетают насосом 14 в эжектор 11. Температуру жижки в разделительном аппарате 12 изменяют регулятором 22 в зависимости от значений измерительного прибора 33, измеряющего температуру топочных газов на выходе из зоны сушки 2. При повышении температуры топочных газов выше 100°C температура жижки понижается, в результате увеличивается ее выход и сокращается подача несконденсировавшихся газов в топку 9. Для предотвращения заполнения разделительного аппарата 12 жижка при достижении уровня патрубка 29 переливается в отдельный резервуар 30. Из разделительного аппарата 12 несконденсировавшиеся пирогазы отводят эжектором 18 и направляют в топку 9, где их сжигают. Температура получаемых в топке 9 топочных газов достигает 1000°C. Образовавшийся в зоне пиролиза 3 уголь через барабанный питатель 26 поступает в зону охлаждения 4 и охлаждается до 150°C сначала за счет отдачи тепловой энергии углем тепловой трубе 28 (которая в свою очередь дополнительно нагревает технологическое сырье в зоне пиролиза 3), а затем за счет отдачи тепла сухим топочным газам, поступающим из конденсатора 16. Тепловая труба 28 представляет собой две системы, сообщающиеся между собой трубами, выполненные из соосно расположенных трубных тепловых рубашек. Верхняя система находится в верхней части зоны пиролиза 3, а нижняя в верхней части зоны охлаждения 4. Полость нижней системы на четверть заполнена теплоносителем. В качестве теплоносителя используется полиэтиленгликоль, имеющий низкое парциальное давление паров. Древесная масса, проходя между трубными тепловыми рубашками в зоне пиролиза 3, нагревается за счет конденсации паров теплоносителя. Конденсат стекает в нижнюю систему, расположенную в зоне охлаждения 4, и вновь испаряется, охлаждая угольную массу, проходящую между трубными тепловыми рубашками в зоне охлаждения 4. Сухие топочные газы, проходя через зону охлаждения 4, нагреваются до температуры 400°C и направляются в рекуперативный теплообменник 17, где они охлаждаются до 150°C. Часть охлажденных газов направляются дымососом 20 в трубопровод 31, что позволяет за счет регулятора 21, соединенного с измерительным прибором 34, регулировать температуру топочных газов, поступающих через патрубок 7 в зону сушки 2. Из зоны охлаждения 4 через барабанный питатель 27 уголь попадает в зону накопления 5, где дополнительно охлаждается до температуры, примерно 40°C, за счет

отдачи тепла воздуху, подаваемому через патрубок 23 воздухоудвкой 19, и выгружается через дозирующий выгрузатель 8. Воздух в зоне накопления 5 прогревается до 100°C и через патрубок 24 воздухоудвкой 19 направляется в рекуперативный теплообменник 17, где температура воздуха возрастает до 350°C, а затем нагнетается в эжектор 18. Для первоначального запуска установки через вентиль 32 в топку 9 подают природный газ. С началом подачи пирогазов из разделительного аппарата подачу природного газа через вентиль 32 прекращают. Для переработки мелкодисперсных древесных отходов рекомендуется шнековая пирогагенетическая установка [26]. Работа установки осуществляется следующим образом (см. рис. 4). Рис. 4 - Шнековая пирогагенетическая установка

Измельченные древесные отходы непрерывно загружают в зону прогрева 1, выполненную в виде шнекового транспортера с обогреваемой рубашкой. Прогрев осуществляют кондуктивно при температуре стенки 95÷105°C за счет конденсации водяных паров, поступающих с зоны охлаждения 8 по тепловой трубе 2. Из зоны прогрева 1 древесная масса с температурой порядка 60°C поступает в зону сушки 3, где древесину высушивают конвекцией топочными газами при температуре 240÷250°C с прогревом материала до 180°C. Часть влажных топочных газов температурой примерно 150°C из зоны сушки 3 отводят через абсорбер 4 в окружающую среду, другую часть смешивают до температуры 240÷250°C с топочными газами температурой 600°C с зоны пиролиза 5 и направляют обратно в зону сушки 3. В абсорбере 4 выбрасываемые в атмосферу топочные газы очищают от примесей рециркулирующим абсорбентом. Из зоны сушки 3 высушенная древесина поступает в зону пиролиза 5, где древесную массу пиролизуют в шнековом транспортере с рубашкой за счет кондуктивного подвода теплоты от поступающих из топки 7 топочных газов температурой 600÷700°C в режиме противотока и самопрогрева пиролизуемой массы за счет теплоты химических реакций. Угольный остаток на выходе из зоны пиролиза 5 имеет температуру порядка 500°C. Образующиеся в зоне пиролиза 5 пирогазы эжектируют сконденсированными в конденсаторе 6 пирогазами, при этом несконденсированные пирогазы отводят в топку 7, а сконденсированные в жижку пирогазы отводят в резервуар. Хладагент пирогазов направляют в топку 7 и переводят в пар. Угольный остаток, поступающий из зоны пиролиза 5, кондуктивно охлаждают в зоне охлаждения 8, выполненной в виде шнекового транспортера с рубашкой, до 120°C испарением конденсата воды, поступающего с зоны прогрева 1 по тепловой трубе 2. Далее уголь дополнительно кондуктивно охлаждают в режиме противотока до 50°C рециркулирующим абсорбентом с температурой 35°C, поступающим из абсорбера 4 и предварительно прошедшим через нейтрализатор 9 и фильтр 10. Абсорбент с температурой ориентировочно 65°C, отводящийся с зоны дополнительного охлаждения 11, охлаждают в теплообменнике 12 до температуры 25°C. Хладагент, использующийся для

охлаждения абсорбента в теплообменнике 12, направляют в конденсатор 6 для конденсирования пирогазов, а затем в топку 7 для превращения в пар. Охлажденный древесный уголь транспортируют на склад; образованный пар, отводящийся из топки 7, используют в технологических или бытовых целях. Для первоначального запуска процесса и выхода на режимные параметры в топку 7 в качестве топлива подают природный газ. Также в топку 7 подают воздух для поддержания процесса горения несконденсировавшихся газов. Потери рециркулирующего абсорбента с выбрасываемыми топочными газами возмещают подачей свежего абсорбента. Температуру воды в тепловой трубе 2 поддерживают в пределах $95\div 105^{\circ}\text{C}$, т.к. при меньшей температуре уменьшается движущая сила для прогрева древесины, а при более высокой температуре повышается парциальное давление пара и усложняется аппаратное оформление теплового насоса. В зону сушки 3 топочные газы подают с температурой в пределах $240\div 250^{\circ}\text{C}$ с прогревом древесины до 180°C , т.к. при температуре топочных газов меньше 240°C увеличивается продолжительность сушки древесной массы, а при температуре топочных газов больше 250°C наблюдается местный прогрев древесины более 180°C и разложение древесины. Температуру топочных газов, подаваемых к зоне пиролиза 5, поддерживают в пределах $600\div 700^{\circ}\text{C}$, т.к. при температуре топочных газов меньше 600°C увеличивается длительность процесса пиролиза и увеличиваются габаритные размеры зоны пиролиза 5, а при температуре топочных газов больше 700°C усложняется аппаратное оформление способа, требующее для изготовления специальные жаропрочные стали. В зоне охлаждения 8 угольный остаток охлаждают до 120°C , т.к. при меньшей температуре увеличиваются габаритные размеры зоны охлаждения 8, а при более высокой температуре повышается парциальное давление пара в тепловой трубе 2 и усложняется аппаратное оформление зоны охлаждения. В зоне дополнительного охлаждения 11 древесный уголь охлаждают до температуры 50°C для предотвращения самовозгорания угля. Преимуществом предлагаемой установки является повышение эффективности процесса за счет использования несконденсировавшихся пирогазов в качестве топлива для сжигания в топке, многократного использования топочных газов в рециркуляционном режиме для сушки, рекуперации тепла угольного остатка для предварительного прогрева древесины перед сушкой, непрерывности процесса, обеспечения экологической безопасности за счет отсутствия токсичных выбросов в окружающую среду. По результатам исследований пирогазетической переработки древесных материалов на кафедре ПДМ защищены пять кандидатских диссертаций [28÷32] и одна докторская диссертация [33].