

Р. Г. Сафин

ПИРОГЕНЕТИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ключевые слова: пиролиз, древесные отходы, установка, жижка, древесный уголь, пиролизный газ, конденсация.

В статье дан обзор исследований проведенных на кафедре переработке древесных материалов по пирогенетической переработке древесных материалов. Представлены описания технологий и аппаратных оформлений процесса пиролиза древесных материалов.

Keywords: pyrolysis, wood waste, installation, zizka, charcoal, pyrolysis gas, condensation.

The article provides an overview of research conducted at the Department of wood materials to wood materials pyrogenetic. Provides descriptions of technologies and hardware design of the pyrolysis of wood materials.

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.

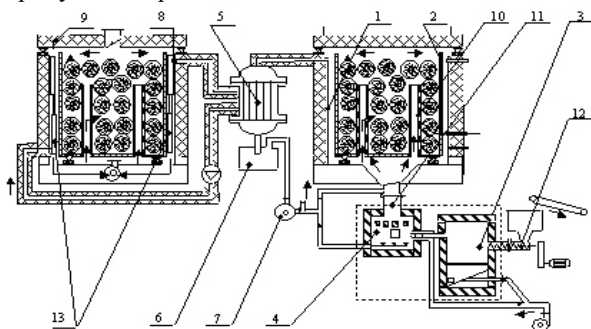


Рис. 1 - Стационарная установка для термической переработки древесных отходов (Пат. №2256686): 1 - камера пиролиза, 2 - контейнер, 3 - газогенератор, 4 - камера сгорания, 5 - конденсатор, 6 - сборник конденсата, 7 - воздуходувка, 8 - камера сушки, 9 - теплоизоляция, 10 - перфорированный коллектор, 11 - 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 мыльного стока [9].

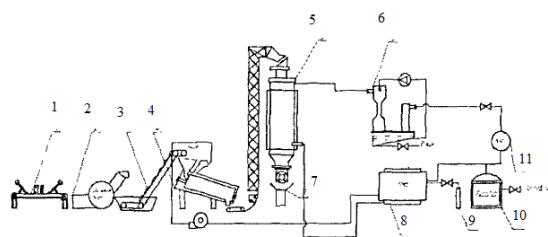


Рис. 2 - Схема промышленной установки для утилизации ОДШ: 1 - установка механической очистки; 2 - рубильная машина; 3 - транспортер; 4 - сушилка; 5 - камера пиролиза; 6 - конденсатор смешения эжекционного типа; 7 - камера активации; 8 - топка; 9 - баллон с газом; 10 - газгольдер; 11 - компрессор

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 аппаратурных 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.

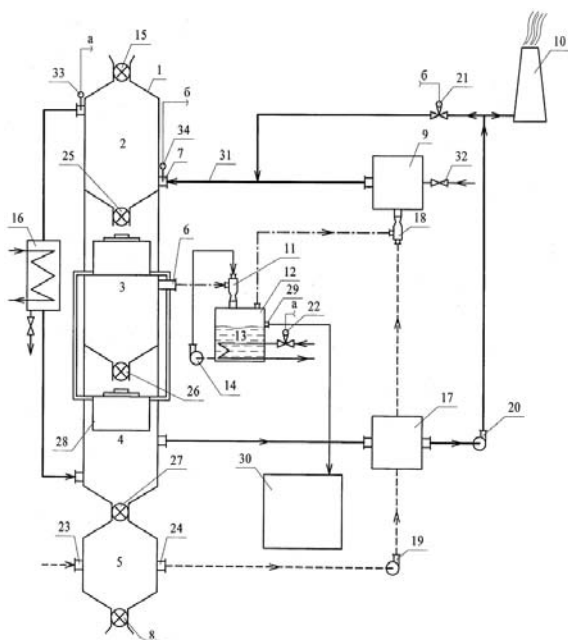


Рис. 3 – Пирогазетическая установка шахтного типа

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 жижки 13 через насос 14 для циркуляции жижки;

дозировующий загрузчик технологического сырья 15 с непрерывной загрузкой; конденсатор 16; рекуперативный теплообменник 17; эжектор неконденсирующихся газов 18; воздухоудвку 19; дымосос 20; регулятор температуры топочных газов 21, подаваемых в зону сушки 2; регулятор температуры жижки 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 направляется 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 воздуходувкой 19, и выгружается через дозирующий выгрузатель 8. Воздух в зоне накопления 5 прогревается до 100°C и через патрубок 24 воздуходувкой 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 пирогазетическая установка [26]. Работа установки осуществляется следующим образом (см. рис. 4).

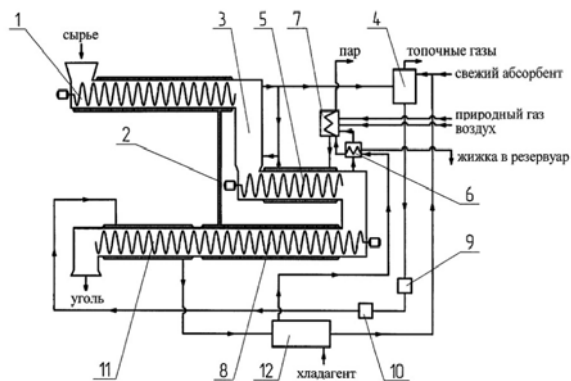


Рис. 4 – Шнековая пирогазетическая установка

Измельченные древесные отходы непрерывно загружают в зону прогрева 1, выполненную в виде шнекового транспортера с обогреваемой рубашкой. Прогрев осуществляют кондуктивно при температуре стенки $95\div 105^{\circ}\text{C}$ 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 $240\div 250^{\circ}\text{C}$ 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 $240\div 250^{\circ}\text{C}$ 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 $600\div 700^{\circ}\text{C}$ 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 жидкую 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 пирогазовой переработки древесных материалов на кафедре ПДМ защищены пять кандидатских диссертаций [28÷32] и одна докторская диссертация [33].

Литература

1. Сафин Р.Г., Сафин Р.Р., Валеев И.А. Пиролизная установка для переработки древесных отходов // "ММТТ-17". г. Кострома. –2004. -Т.9.-С. 135.
2. Сафин Р.Г., Сафин Р.Р., Валеев И.А. Экспериментальное исследование влияния давления при пиролизе древесины // Вестник Казанского технологического университета // №1. –2005. -С. 256-260.
3. Сафин Р.Р., Сафин Р.Г., Валеев И.А. Математическое моделирование процесса пиролиза древесины при регулировании давления среды // Вестник Московского государственного университета леса // №2. - 2005.-С. 168-174.
4. Патент РФ №2256686. Углевывжигательная печь /Сафин Р.Г., Сафин Р.Р., Валеев И.А. и др. –Бюл. № 18, 2005.
5. Патент № 2346023, МПК C10B53/02, F23G027. Установка для пиролиза древесины / Грачев А.Н., Исаков Т.Д., Сафин Р.Г., Валеев И.А., Воронин А.Е. Заявитель и патентообладатель Научно-технический центр по разработке прогрессивного оборудования. – Бюл. № 4, 2009 г.
6. Грачев А.Н. Пиролиз отходов предприятий деревообрабатывающей отрасли / / Грачев А.Н., Исаков Т.Д., Валеев И.А., Иманаев Р.М. // Вестник Казанского государственного технологического университета. – 2006. - №6-ЧП. –С.71-77
7. Исаков Т.Д. К вопросу утилизации отработанных деревянных шпал / Т.Д. Исаков, А.Н. Грачев, П.А. Кайнов, А.И. Ахметзянов // Известия Самарского научного центра РАН. Самара. – 2008. С.21-24
8. Исаков Т.Д. Энерго- и ресурсосберегающие при утилизации отработанных деревянных шпал методом пиролиза / Т.Д. Исаков, А.Н. Грачев, В.Н. Башкиров, Р.Г. Сафин // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2008. -№11-12. –С.156-160
9. Патент № 2171274, МПК C11B13/02 Установка для извлечения кислот из мыльного стока / Сафин Р.Г., Башкиров В.Н., Лашков В.А. и др., патентообладатель Научно-технический центр по разработке технологий и оборудования. Бюл №21, 2001.
10. Грачев А.Н. Экспериментальные исследования скорости убыли массы древесины в процессе абляционного пиролиза / А.Н. Грачев, Р.Г. Хисматов, А.А. Макаров, Р.Г. Сафин // Лесной журнал. Архангельск. – 2009 №4, -С.116-123.
11. Грачев А.Н. Исследование быстрого пиролиза древесины в абляционном режиме / А.Н. Грачев, Р.Г. Хисматов, Р.Г. Сафин, В.Н. Башкиров // Известия Самарского научного центра академии наук, -2008, - С.25-29
12. А.Н. Грачев Математическая модель термического разложения древесины / А.Н. Грачев, Р.Г. Сафин, А.В. канарский, А.Т. Сабиров, Р.Г. Хисматов // ИВУЗ. Проблемы Энергетики, 2010. №6, -С.79-85
13. Макаров А.А. Математическая модель термического разложения древесины в абляционном режиме / А.А. Макаров, А.Н. Грачев, Р.Г. Сафин, А.Т. Шаймуллин // «Вестник КГТУ». -2011.№8, - С.68-73
14. Грачев А.Н. Результаты математического моделирования термического разложения древесины в абляционном режиме / А.Н. Грачев, А.А. Макаров, Р.Г. Сафин // Вестник Казанского государственного технологического университета. Казань. – 2011. - №14 – С.77-82.
15. Тунцев Д.В. Математическая модель термического разложения древесины в условиях кипящего слоя и конденсации продуктов разложения / Д.В. Тунцев, А.Н. Грачев, Р.Г. Сафин // Вестник казанского технологического университета. – 2011. - №14. – С. 130-137.
16. Грачев А.Н. Исследование свойств жидкого продукта быстрого пиролиза отходов деревообработки / А.Н. Грачев, Р.Г. Сафин, М.А. Таймаров, К.Х. Гильфанов, Д.В. Тунцев // Известия вузов. Проблемы энергетики, - 2009. -№ 11-12. - С.80-83
17. Сафин Р.Г. Современное состояние процесса пирогазовой переработки органических веществ / Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, И.И. Хуснуллин // Вестник казанского технологического университета. – 2011. - №3. – С. 169-173.

18. Сафин Р.Г. Моделирование процесса сушки древесных частиц при кондуктивном подводе тепла / Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, А.Р. Хисамеева // Вестник казанского технологического университета. – 2011. - №4. – С. 84-88.
19. Тимербаев Н.Ф. Моделирование процесса пиролиза древесины в установке для производства древесного угля / Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, И.И. Хуснуллин // Вестник казанского технологического университета. – 2011. - №9. – С. 51-56.
20. Сафин Р.Г. Кондуктивный теплообмен дисперсного материала в установке для производства угля / Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, А.Р. Садртдинов, И.И. Хуснуллин // Вестник казанского технологического университета. – 2011. - №18. – С. 69-75.
21. Сафин Р.Г. Непрерывно действующая мобильная установка для производства древесного угля / Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, А.Р. Садртдинов, в.В. Степанов // Вестник казанского технологического университета. – 2011. - №18. – С. 201-205.
22. Сафин Р.Г. Перспективы развития лесопромышленного комплекса РТ на базе научных разработок кафедр лесотехнического профиля КНИТУ / Р.Р. Сафин, Р.Г. Сафин // Деревообрабатывающая промышленность. – 2012. - №3. – С. 22-27.
23. Сафин Р.Г. Энергонезависимая установка непрерывной переработки древесных отходов / Р.Г. Сафин, А.Р. Садртдинов, И.И. Хуснуллин // Вестник казанского технологического университета. – 2013. - №16. – С. 183-188.
24. Сафин Р.Г. Технологическая схема газификации жидкого продукта контактного пиролиза / Д.В. Тунцев, Р.Г. Сафин, А.М. Касимов, Р.Г. Хисматов, З.Г. Саттарова // Вестник казанского технологического университета. – 2013. –Т.16. №19. – С. 139-141.
25. Сафин Р.Г. Технологическая схема подготовки жидких продуктов пиролиза древесных отходов к газификации / Д.В. Тунцев, Р.Г. Сафин, А.М. Касимов, Р.Г. Хисматов, И.С. Романчева, А.С. Савельев // Вестник казанского технологического университета. – 2013. – Т.16. №21. – С. 258-260.
26. Патент РФ № 2463331, МПК C10B53/02 Способ производства древесного угля / Тимербаев Н.Ф., Зиятдинова Д.Ф., Сафин Р.Р., Сафин Р.Г., и др., Бюл №28, 2012.
27. Патент РФ № 2568061, МПК C10B1/04 Установка для производства древесного угля / Тимербаев Н.Ф., Зиятдинова Д.Ф., Сафин Р.Г., и др., Бюл №33, 2012.
28. Валеев И.А. Термическая переработка отходов деревообрабатывающих предприятий / Автореферат дисс. канд. техн. наук, Казанский государственный технологический университет, Казань, 2006 г. – 16 с.
29. Исхаков Т.Д. Энерго- и ресурсосбережение при утилизации отработанных древесных шкал методом пиролиза / Автореферат дисс. канд. техн. наук, Казанский государственный технологический университет, Казань, 2008 г. – 16 с.
30. Хисматов Р.Г. Термическое разложение древесины при кондуктивном подводе тепла / Автореферат дисс. канд. техн. наук, Казанский государственный технологический университет, Казань, 2010 г. – 16 с.
31. Макаров А.А. Термическое разложение древесины в режиме быстрого абляционного пиролиза / Автореферат дисс. канд. техн. наук, Казанский государственный технологический университет, Казань, 2011 г. – 16 с.
32. Тунцев Д.В. Совершенствование техники и оборудования процесса термического разложения древесины в кипящем слое / Автореферат дисс. канд. техн. наук, Казанский государственный технологический университет, Казань, 2011 г. – 16 с.
33. Грачев А.Н. Разработка методов расчета технологии и оборудования пирогазификационной переработки древесины в жидкие продукты / Автореферат дисс. докт. техн. наук, Казанский государственный технологический университет, Казань, 2012 г. – 36 с.

© Р. Г. Сафин – д.т.н., профессор, зав. кафедрой переработки древесных материалов КНИТУ, safin@kstu.ru.