

**Министерство образования и науки России
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Казанский национальный исследовательский
технологический университет»**

Н.Ф. Тимербаев

**КОМПЛЕКСНАЯ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ
ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ С
ПРИМЕНЕНИЕМ ПРЯМОТОЧНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ**

Монография

Казань 2011

УДК 662.61:662.63
ББК 37.130

Тимербаев Н.Ф.

Комплексная энерготехнологическая переработка древесных отходов с применением прямоточной газификации: монография/ Н.Ф. Тимербаев/ М-во образ. и науки России, Казань: КНИТУ, 2011. – 252 с.
ISBN 978-5-7882-1162-6

Представлены результаты исследования процессов термической переработки древесных отходов: приведена классификация и энергетические характеристики древесных отходов как биотоплива, рассмотрена кинетика процесса прямоточной газификации древесины, представлено аппаратурное оформление процессов термической переработки древесных отходов.

Предназначена для ИТР, аспирантов и студентов, обучающихся по лесотехническим специальностям.

Подготовлена на кафедре «Переработка древесных материалов».

Печатается по решению редакционно-издательского совета Казанского Национального исследовательского технологического университета.

Рецензенты: зам. ген. директора
ВКНИИЛП по научной работе
канд. техн. наук, ст. науч. сотр. А.А. Аксянов

директор
НПП «ТермоДревПром»
канд. техн. наук П.А. Кайнов

ISBN 978-5-7882-1162-6

© Тимербаев Н.Ф.,
© Казанский национальный
исследовательский
технологический
университет,
2011

ВВЕДЕНИЕ

Россия - страна с огромным запасом лесных ресурсов. Лесные ресурсы России считаются одними из богатейших в мире. Площадь лесного фонда и лесов, не входящих в него, превышает в Российской Федерации 1180 млн. га. Лесные ресурсы РФ представлены тремя основными категориями: хвойные (сосна, кедр, ель, пихта, лиственница) - 70,8%; мягколиственные (береза, осина, липа, тополь, ива, ольха) - 16,7%; твердолиственные (береза каменная, дуб, бук, ясень, клен, вяз и другие ильмовые, граб, акация белая, саксаул) - 2,4%.

Современная экономика Российской Федерации имеет ярко выраженный сырьевой характер и более чем наполовину состоит из добычи и экспорта углеводов. Доля продукции лесопромышленного комплекса (ЛПК) в валовом национальном продукте Российской Федерации не превышает 5 %. Повышение эффективности и конкурентоспособности деревоперерабатывающих предприятий в Российской Федерации - одна из приоритетных задач развития экономики.

Среди факторов, сдерживающих развитие предприятий ЛПК, низкий уровень их технической оснащенности является причиной образования большого количества древесных отходов. Ежегодно на предприятиях лесопромышленного комплекса России образуются миллионы тонн древесных отходов. Наиболее простой способ утилизации древесных отходов состоит в их термической переработке путем прямого сжигания с целью получения тепловой энергии. Более сложными, но более эффективными считаются методы конверсии древесных отходов в жидкое либо газовое состояние с получением продуктов, востребованных химической и другими отраслями промышленности. Один из таких продуктов, который можно получить путем прямоточной газификации древесных отходов, - это синтез-газ, широко применяемый в химической промышленности.

Разрабатываемые и используемые в настоящее время слоевые газификаторы ориентированы в основном на получение тепловой энергии и в большинстве своем вырабатывают генераторный газ, забалластированный азотом, парами воды и загрязненный продуктами сухой перегонки и пиролиза древесины.

Различные неслоевые типы газификаторов позволяют получать более качественный генераторный газ, однако они работают под большим избыточным давлением либо при высоких температурах процесса, что значительно усложняет их аппаратное оформление и, как следствие, их стоимость, что делает нерентабельной переработку древесных отходов в условиях малых деревообрабатывающих предприятий.

Помимо этого, более 70 % от общей массы древесных отходов ЛПК имеют высокую влажность, что значительно осложняет их энерготехнологическую переработку, так как это основной параметр, лимитирующий практически все процессы, протекающие при термохимической переработке древесины.

Вышеперечисленные факторы обуславливают актуальность разработки технологий комплексной энерготехнологической переработки древесных отходов, которые позволяли бы получать тепловую энергию на технологические нужды предприятий ЛПК, генераторный газ в качестве топлива для существующих котельных агрегатов либо синтез-газ, пригодный для дальнейшего получения из него различных химических продуктов в условиях малых деревообрабатывающих предприятий. Для решения данной задачи необходима разработка научно обоснованных технологических решений, позволяющих получить конечные продукты заданного качества. Таким образом, комплексное исследование процессов сушки высоковлажных древесных отходов и переработки их методом прямоточной газификации, разработка методов расчета и аппаратного оформления технологических процессов комплексной переработки древесных отходов - актуальная задача, имеющая большое значение для экономики России.

Глава 1

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ

Развитие промышленности всегда сопровождается увеличением отрицательного воздействия на природу и человека. Разнообразные отходы, образующиеся на стадии производства, длительное время сохраняются, накапливаются и трансформируются. Особенно это относится к органическим отходам, количество которых неуклонно растет по мере развития промышленности.

Низкий уровень технологий позволяет перерабатывать и использовать лишь несколько десятков наименований отходов. Однако в условиях экономического подъема и повышения инвестиционных потоков отходы как вторичное сырье становятся источником расширения сырьевой базы промышленности, важным фактором экономии материалов, повышения эффективности производства и улучшения экологической обстановки за счет снижения загрязнения окружающей среды.

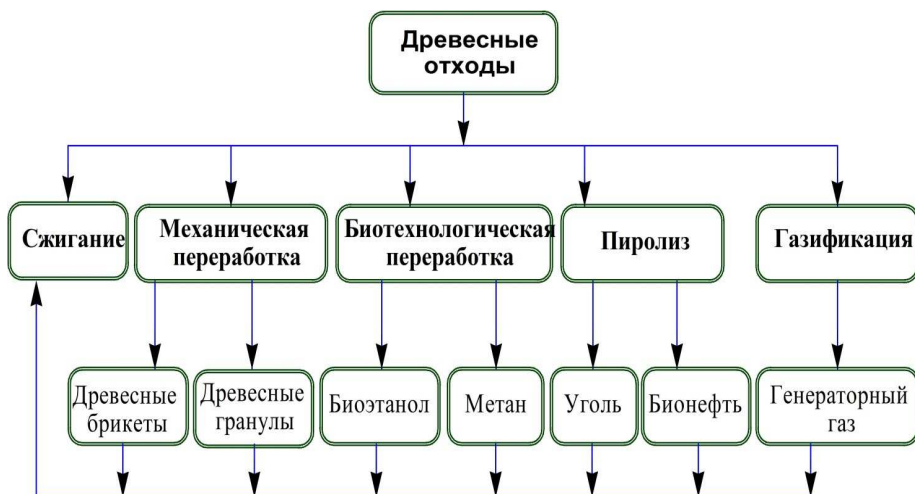


Рис.1.1. Энергетические способы переработки биомассы

Одним из распространенных видов отходов, имеющих высокий энергетический потенциал, являются древесные отходы.

Поэтому вопрос переработки древесных отходов становится все более актуальным для предприятий ЛПК. Термические методы переработки древесной биомассы позволяют обеспечить комплексную переработку невостребованного древесного ресурса с умеренными капитальными затратами с получением тепловой энергии либо различных химических продуктов.

Наибольшее развитие получили три основных направления энергетической переработки биомассы: пиролиз, газификация и сжигание (рис. 1.1). Переработка биомассы позволяет получить различные продукты в зависимости от выбора процесса. При переработке древесной биомассы методом пиролиза возможно получение угля и жидкости. Образующаяся в процессе пиролиза жидкость может использоваться как сырье для химических продуктов или в качестве топлива.

К основным проблемам использования и переработки загрязненных древесных отходов относятся: неустойчивость процессов термохимической переработки и утилизации, связанных с изменчивостью свойств отходов; практически отсутствие эффективных методов переработки отходов в условиях малых предприятий [13, 24, 77, 85].

Таким образом, основными задачами на данной стадии работы являются:

- классификация древесных отходов;
- анализ современного состояния техники и технологий энерготехнологической переработки и утилизации древесных отходов;
- анализ существующих подходов к математическому моделированию процессов энерготехнологической переработки и утилизации отходов деревообработки;
- формализация свойств древесины как объекта термического воздействия
- исследование механизмов термического разложения древесины
- исследование структурно-механических свойств древесных отходов
- анализ теоретических основ процесса прямоточной газификации.

1.1. Классификация и энергетические характеристики древесных отходов

Отходы ЛПК можно разделить на несколько групп [182]:

Отходы лесозаготовок - кустарник, тонкомер, ветки и верхушки деревьев, хвоя, пни, т.е. все то, что считается некоммерческой древесиной, отходами от лесозаготовок.

Отходы деревообработки - все виды топлива, для которого дерево или части дерева являются исходным материалом, не требующим никакой химической обработки, например дрова, щепы, опилки, стружка, кора.

Отходы потребления - это бывшие в употреблении пиломатериалы; сырье идет из строительной и упаковочной промышленности, от разборки деревянных конструкций и изделий.

Иногда выделяют в отдельную группу зелень и кору хвойных пород древесины. В них содержится очень много экстрактивных веществ, которые могут быть выделены и использованы в медицинской, пищевой и других отраслях промышленности, при этом они не являются дефицитным материалом, используемым в каком-либо серьезном производстве. Однако у коры и зелени есть и существенные недостатки. Кора обладает более низкой теплотой сгорания и большей зольностью, чем другие виды древесных отходов [177]. Также у коры и зелени всегда большая влажность, поскольку их никогда не сушат. Эти две проблемы вызывают третью: увеличение инвестиций и снижение эффективности при их энергетическом использовании.

Опилки и древесная щепа могут рассматриваться как биотопливо, прошедшее меньшую степень переработки. Содержание влажности в них может быть достаточно большим, до 70%, что позволяет считать их «влажным» топливом. Однако опилки и щепа могут быть достаточно сухими, если их получают в процессе производства мебели или сухих пиломатериалов.

При применении опилок и щепы в качестве топлива необходимо учитывать свойства лиственных и хвойных пород древесины. Древесина мягких (хвойных) пород лучше подходит для сжигания в котельных любой мощности, причем, чем ниже мощность установки, тем выше необходимость использовать именно хвойные опилки и щепу. Древесина лиственных пород содержит больше тяжелых металлов и иных элементов,

губительных как для самой установки, так и для окружающей среды [25, 56]. В отличие от хвойных лиственные деревья в процессе роста впитывают все вещества, содержащиеся в почве, что и приводит к концентрации вредных веществ в лиственных опилках и щепе. Поэтому при сжигании отходов деревообработки в черте города необходимо предусмотреть систему очистки топочных газов.

Отходы деревообрабатывающих производств можно классифицировать (табл. 1.1):

- по сортименту исходного сырья (отходы пиломатериалов, отходы фанеры и древесно-волоконистых плит, отходы древесно-стружечных плит);

- по породам древесины (хвойная, лиственная);

- по влажности (сухие до 15%, полусухие -16-30%, влажные 31% и выше, сверхвлажные – 100% и выше);

- по структуре (кусковые крупные, кусковые средние, кусковые мелкие, сыпучие);

- по стадийности обработки (первичные, вторичные).

Количество отходов деревообрабатывающих производств зависит от качества поставляемого сырья, типа и размера изготавливаемой продукции, технической оснащенности предприятия и его мощности и составляет в среднем 45-63% от исходного сырья (табл. 1.1).

Таблица 1.1

*Виды и количество кусковых отходов
деревообрабатывающих производств*

Производство	Сырье	Кусковые отходы	Количество отходов, % от сырья
Производство черновых заготовок	Пиломатериалы	Рейки, торцовые отрезки	50
Столярно-мебельные производства	Пиломатериалы	Рейки, торцовые отрезки	35-40
	Древесные плиты и фанера	Обрезки плит и фанеры	10-15
Производство	Пиломатериалы,	Рейки,	20-40

паркета	черновые заготовки	отрезки досок	
---------	-----------------------	------------------	--

Отходы ЛПК должны перерабатываться тем или иным способом для достижения приемлемой экономической отдачи посредством автоматизации тепловых установок. Автоматика может быть выполнена только в том случае, если топливо достаточно однородно и позволяет обеспечить его подачу с приемлемым расходом и надежностью. Важной задачей в этом отношении является снижение насколько это возможно, человеческого фактора. Экономическими конкурентами древесных отходов по этим показателям являются в основном жидкое топливо и природный газ. Жидкое топливо и газ можно легко адаптировать к автоматике, поскольку транспортировка в трубах происходит легко. Для достижения такой же простоты в транспортировке древесные отходы должны перерабатываться в гранулы. Другая важная причина переработки биомассы - это повышение ее теплоты сгорания и легкости управления процессом горения.

Если влажность цельной древесины увеличивается на 25% за двое суток, то влажность измельченной, то есть сыпучей, древесины повышается на 28% за одни сутки. Наиболее интенсивно древесина поглощает влагу от 0 до 12%, и различие в поглощении влаги цельной древесиной и измельченной продолжает быть заметным до увеличения показателя влажности от 18 до 26%. Динамика поглощения влаги оказывается одинаковой для цельной и для измельченной древесины [111, 113]. Таким образом, сорбирующие свойства древесных отходов зависят от их структуры, размера, а также от их начальной влажности.

Топливные свойства древесины определяются рядом характеристик, таких как теплота сгорания, химический состав, влажность, твердость, количество летучих веществ, количество твердого углерода, содержание и состав золы, характеристики плавления золы, характеристики ошлакования золы, количество загрязняющих веществ, пыли, спор грибов. Топливную древесную щепу часто производят из различных пород деревьев с различным соотношением стволовой древесины, коры, листвы, ветвей, почек и даже шишек, содержание которых изменяет свойства топлива.

Основными компонентами клеток древесины являются целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин, которые составляют 99% массы древесного материала [224]. Целлюлозу и гемицеллюлозу

образуют длинные цепи углеводов (таких, как глюкоза), лигнин же является осложненным компонентом полимерных фенольных смол. Лигнин тесно связан с гемицеллюлозой, так как действует как склеивающий агент, склеивая пучки цепей целлюлозы и растительные ткани. Таким образом, лигнин придает растению механическую прочность. Он богат углеродом и водородом, которые являются основными элементами производства теплоты. Поэтому лигнин обладает более высокой теплотворной способностью по сравнению с целлюлозой. Он растворим в органических растворителях (гексане, ацетоне, этаноле) и горячей воде. Древесина по сравнению с корой и листвой содержит относительно малое количество экстрактивных веществ. Приблизительно половина массы свежесрубленного дерева состоит из воды. Вторая половина представляет собой сухое древесное вещество, содержащее 85% летучих веществ, 14,5% твердого углерода и 0,5% золы. В безводной древесине общее содержание углерода составляет приблизительно 50%. При термическом воздействии на древесину составляющие ее компоненты превращаются в водяной пар, двуокись углерода, окислы азота, окись серы и золу. Древесина практически не содержит серы. Максимальное содержание серы в древесине составляет 0,05%. Различные породы деревьев имеют различное содержание азота, которое составляет в среднем 0,75% [246].

Теплотворные характеристики различных типов топлива зависят от соотношения содержащихся в них элементов. Углерод и водород увеличивают теплоту сгорания, в то время как высокое содержание кислорода в древесине ее уменьшает [246]. По сравнению с другими видами топлива древесина имеет довольно низкое содержание углерода (около 50% сухого веса), высокое содержание кислорода (около 40%) и, следовательно, довольно низкую теплоту сгорания на единицу сухого веса. Сухие древесина и кора характеризуются очень низким уровнем зольности при сгорании. Так, один плотный кубический метр древесного топлива дает только 3-5 кг чистой золы. Однако на практике зола часто содержит некоторое количество песка и продуктов неполного сгорания углерода.

Горючие вещества, содержащиеся в твердом топливе, можно разделить на две группы: летучие вещества и твердый углерод. Обычно древесина характеризуется высоким содержанием

летучих веществ и низким содержанием твердого углерода [224]. 75 % энергии древесины генерирует за счет сгорания летучих веществ или газов и 25% - в результате сгорания твердого углерода (раскаленные угли). Из-за большого количества летучих веществ, содержащихся в древесине, при ее горении образуются высокие языки пламени, поэтому для сгорания топлива требуется значительное пространство [214]. Древесная кора и торф имеют аналогичные характеристики горения.

Содержание влаги в древесном топливе (составляющее обычно от 20 до 65%) зависит от различных факторов, включая климатические условия, время года, породу дерева, а также от свойств части ствола, используемой в качестве топлива, и этапа хранения топлива. Теплотворная способность определяется высшей (ВТС) или низшей теплотой сгорания (НТС). Величина низшей или высшей теплоты сгорания может определяться на единицу сухого топлива или на единицу топлива с учетом его влажности. Кроме влаги, содержащейся в топливе, влага также образуется при сгорании водорода. Значение влажности определяет различие между высшей и низшей теплотой сгорания. При определении значения ВТС допускают, что водяной пар, находящийся в топочных газах, конденсируется в воду, а при вычислении значения НТС предполагается, что влага находится в виде насыщенного пара [175]. Значение ВТС топливной биомассы обычно составляет от 18 до 21 МДж/кг, что соответствует ВТС торфа, но значительно ниже, чем ВТС нефти (табл. 1.2).

Теплотворная способность древесины в значительной степени определяется уровнем влажности, так как испарение воды требует затрат энергии.

Таблица 1.2
Значения теплоты сгорания отдельных видов топлива

Вид топлива	Древесина (сухая)	Торф (сухой)	Каменный уголь	Нефть
ВТС (МДж/кг)	18,5-21,0	20,0-21,0	23,3-30,6	40,0-42,3

1.2. Термохимические методы переработки отходов ЛПК

В настоящее время в мировой промышленной практике используются десятки различных конструкций и технологических

схем переработки древесных отходов, конструктивные особенности которых определяются параметрами отходов и национальными требованиями к охране природной среды [168, 172].

Термохимические методы, согласно диаграмме, представленной на рис. 1.2, делятся на три основных направления: сжигание, пиролиз, газификация. Эти процессы, хотя и отличаются друг от друга только количеством вводимого кислорода в камеру термической переработки и температурой, образующейся при этом, имеют различное аппаратное оформление и представляют собой весьма сложные явления, включающие множество связанных между собой физико-механических и химических процессов, таких как: тепломассообмен, фазовые переходы, процессы переноса в реагирующих газовых смесях и движение среды. При этом химические процессы представляют собой реакции, состоящие из целого ряда элементарных взаимодействий.

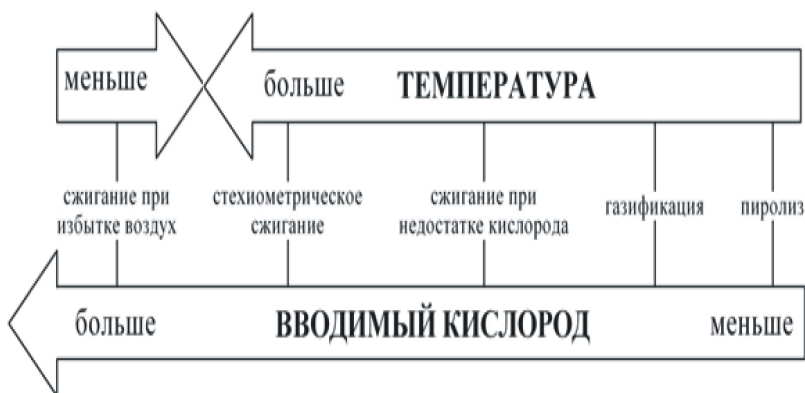


Рис. 1.2. Сравнительная диаграмма термохимических процессов

1.2.1. Техника и технологии сжигания отходов ЛПК

Процесс горения можно охарактеризовать как нестационарный турбулентный тепломассообмен при наличии динамических источников тепла и вещества. Хотя такое представление и определяет пути анализа процессов горения, но конкретное решение задач теории горения при этом затруднено. При решении задачи горения топлива в слое процесс сжигания, как

правило, рассматривают как совокупность стадий прогрева, термического разложения и выгорания коксового остатка. При этом процесс сжигания твердого топлива в слое представляется в следующем виде. Топливо, содержащее углерод, влагу, золу и большое количество различных углеводородных соединений, при попадании в топочную камеру и нагревании выделяет в окружающий объем влагу и летучие. В результате выделения этих составляющих остается твердый остаток - кокс, состоящий из углерода и золы. Выделение и горение летучих оказывает большое влияние на протекание процесса горения твердого топлива, определяя условия для воспламенения и выгорания коксового остатка. Выгорание летучих - быстротекущий процесс. В настоящее время можно считать практически установленным тот факт, что выгорание летучих занимает не более 10% общего времени выгорания частицы. Таким образом, выгорание углерода кокса составляет не менее 90% общего времени выгорания частицы твердого топлива [147,148]. Поэтому углерод является обычно основной, важнейшей составляющей твердого топлива, а закономерности горения углерода в основном определяют сгорание частиц твердого топлива. Горение углерода - гетерогенный процесс, определяемый как кинетикой горения на поверхности и в глубине углеродного массива частицы, так и диффузионным переносом кислорода и продуктов сгорания у горячей поверхности частицы. Задача о горении углеродной частицы в наиболее полной форме представлена в работах А. С. Предводителя, Л. Н. Хитрина Л. Н. и В. В. Померанцева [147, 231, 150].

При горении углерода на поверхности частицы кислород расходуется и непрерывно подводится из окружающего газового объема. Продукты сгорания отводятся от поверхности. Таким образом, химический процесс горения сопровождается физическим процессом встречной диффузии. Следствием одновременного протекания этих процессов является определенное значение парциальных давлений продуктов сгорания и кислорода у поверхности горячей частицы. Распределение концентраций тесно связано с условиями процесса (рис. 1.3). При этом задача выгорания углерода заключается в учете одновременно протекающих гетерогенной реакции на углеродной поверхности и гомогенной реакции горения окиси углерода в объеме около

поверхности при наличии сопутствующих диффузионных процессов [150].

Эффективное и полное сгорание - необходимое условие использования древесины в качестве экологически приемлемого вида топлива. Процесс сгорания должен обеспечивать высокую степень использования энергии и, следовательно, полное уничтожение древесины и не должен вызывать образование нежелательных в экологическом отношении соединений.

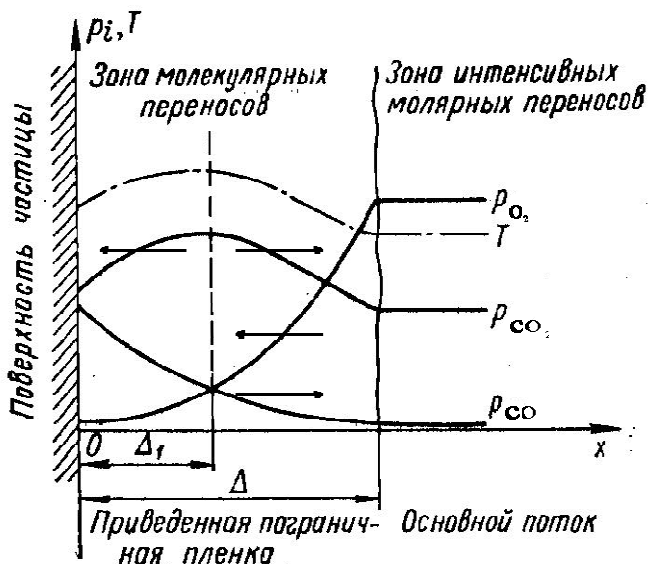


Рис. 1.3. Распределение концентраций отдельных компонентов и направление диффузионных потоков вблизи поверхности горящей углеродной частицы

Выбросы, образующиеся при неполном сгорании, могут быть вызваны:

- неправильным смешением воздуха и топлива в топливной камере, в результате чего образуются локальные зоны с недостатком воздуха;

- недостаточным количеством кислорода;

- низкой температурой горения;

- недостаточным временем пребывания.

Высушивание и газификация - первые этапы процесса сгорания твердого топлива. Однако относительное значение этих

этапов зависит от применяемой технологии сжигания, характеристик топлива и условий процесса горения. Возможно разделение этапов высушивания, пиролиза и газификации, которое применяется, например, при сжигании топлива со ступенчатым впуском воздуха. На установках сжигания биомассы большой мощности с непрерывной подачей топлива эти процессы происходят на различных участках колосниковой решетки. Однако на установках периодического действия имеется четкое разделение между этапами выделения летучих веществ и сгорания углей. При сжигании частиц больших размеров наблюдается некоторое перекрытие этапов горения. При дозируемой загрузке топлива, например при сжигании дров в дровяных печах и каминах, степень перекрытия этапов горения значительно больше.

Испарение влаги происходит при достаточно низкой температуре (70-130 °С). Часть энергии, выделяемой в процессе горения, уходит на испарение воды, что уменьшает температуру в топке, замедляя процесс сжигания топлива. В котлах на древесном топливе поддержание процесса горения становится невозможным, если влажность древесины превышает 70% [135, 147]. Испарение содержащейся во влажной древесине влаги и последующий нагрев водяного пара требуют значительных затрат энергии. Это приводит к падению температуры ниже минимального уровня, требуемого для обеспечения процесса горения. Следовательно, влажность является одной из наиболее важных переменных характеристик топлива.

Выход летучих веществ из древесины начинается при температуре 200 °С, и скорость выхода увеличивается с повышением температуры. Сначала происходит разложение гемицеллюлозы и затем, при более высокой температуре, разложение целлюлозы. При температуре 400 °С скорость выхода летучих компонентов резко возрастает. Однако при температуре 400-500 °С скорость выхода летучих может снизиться, что обусловлено процессом разложения лигнина, происходящим в пределах всего температурного диапазона, но вызывающим наибольшие потери основного веса при более высоких температурах.

Газификацию можно определить как термическую деструкцию (выход летучих) в присутствии подаваемого снаружи окисляющего вещества [114], который оптимизируют по

максимальному выходу газа. Температура газификации составляет от 400 до 1100 °С. Выделяемый газ содержит в основном CO, CO₂, H₂O, H₂, CH₄ и другие углеводороды. Газификация может осуществляться такими окислителями, как воздух, кислород, пар, CO₂.

Сгорание в идеальном случае можно определить как полное окисление топлива. Горячие газы, выделяемые при сгорании топлива, могут применяться для прямого нагрева в различных целях в установках сжигания топлива малой мощности, для нагрева воды в котлах систем центрального отопления малой мощности, для нагрева воды с целью выработки электроэнергии в установках большей мощности, в качестве источника технологического тепла или для нагрева воды в системах центрального теплоснабжения.

Горение биомассы представляет собой сложный процесс со многими переменными, которые прямо или косвенно воздействуют на уровни выбросов и эффективность использования энергии [126].

Теплообмен может осуществляться посредством передачи, конвекции и излучения теплоты. Для обеспечения низкого уровня выбросов при неполном сгорании топлива необходимо минимизировать потери тепла в топочной камере посредством оптимизации переменных характеристик, оказывающих прямое воздействие на механизмы теплопередачи. Значительное количество теплоты аккумулируется в стенках топочной камеры, забирающих теплоту из объема топочной камеры на первоначальном этапе процесса горения. Это явление играет особенно важную роль при сжигании биомассы в установках малой мощности. Температура топочной камеры может быть значительно повышена путем предварительного подогрева воздуха. Подаваемый воздух может быть предварительно подогрет посредством теплообмена с топочным газом после выпуска топочного газа из топочной камеры.

Любое топливо требует использования соответствующего количества воздуха (кислорода) с тем, чтобы обеспечить его стехиометрическое преобразование, то есть коэффициент избытка воздуха должен быть равен 1. Стехиометрическое преобразование топлива происходит, когда используется точное количество кислорода, необходимое для преобразования всего топлива при идеальных условиях. В случае со сжиганием биомассы коэффициент избытка воздуха должен значительно превышать 1, с

тем, чтобы обеспечить эффективное смешение подаваемого воздуха и топливного газа [73].

Значение уровня влажности, как указывалось ранее, является одной из важнейших характеристик топлива. В установках периодического действия содержание влаги непрерывно изменяется в зависимости от степени выгорания топлива. Влага высвобождается на этапе выхода летучих веществ, и ее содержание уменьшается по мере выгорания топлива. Поэтому негативное воздействие уровня влажности на процесс горения может быть значительным на первых этапах фазы выхода летучих веществ, что может приводить к повышению уровня выбросов от неполного сгорания топлива.

Время пребывания топлива в топочной камере, необходимое для полного его сгорания, непосредственно зависит от температуры горения и в определенной степени от времени смешения [73]. Однако в установках с дозированным сжиганием топлива влажность и состав топлива непрерывно изменяются в зависимости от его степени выгорания. При этом изменяется адиабатическая температура горения. Адиабатическая температура горения повышается по мере сгорания топлива при постоянном коэффициенте избытка воздуха.

Из вышеприведенного анализа процесса горения очевидно, что на сжигание топлива оказывают значительное влияние конструкция и принцип работы топочной камеры, выбор вида топлива и возможности управления технологическим процессом. Характеристики используемых топлив, такие как теплотворная способность, плотность, толщина, изоляционная способность, поверхностные характеристики, оказывают влияние на значение температуры в топочной камере.

Существуют следующие основные технологии сжигания биомассы:

- сжигание топлива в неподвижном слое;
- сжигание топлива в псевдооживленном (кипящем и циркулирующем) слое;
- факельное сжигание;

Установки, предназначенные для сжигания топлива в неподвижном слое, включают топки с колосниковыми решетками и загрузчики с нижней подачей топлива. Первичный воздух проходит через неподвижный слой топлива, в котором происходит

подсушивание, газификация и обугливание топливного материала. Выделившиеся горючие газы сгорают после подачи вторичного воздуха, как правило, в зоне горения, отделенной от топливного слоя [55].

В топке с псевдооживленным слоем топливная биомасса сжигается в самоперемешивающейся взвеси газа и материала слоя, в который снизу подается воздух для горения. В зависимости от скорости псевдооживления различают сжигание топлива в кипящем псевдооживленном слое и циркулирующем псевдооживленном слое.

Факельное сжигание может применяться для сжигания топлива, состоящего из мелких частиц (имеющих средний размер менее 2 мм). В топочную камеру подается смесь топлива и первичного воздуха горения. Топливо сгорает во взвешенном состоянии, и после подачи вторичного воздуха происходит выгорание газов. Существуют также различные варианты этих технологий. Примерами могут служить установки, предназначенные для сжигания топлива с забрасывателями-распределителями и циклонными форсунками.

Сжигание топлива может быть организовано как в однокамерных, так и в двухкамерных топках. В двухкамерной топке первичное и вторичное сжигание топлива осуществляется в физически отделенных друг от друга топочных модулях [19]. Двухкамерные топки применяют, когда в качестве топлива используется относительно влажная древесная щепа. Двойная топка включает шнековый загрузчик топлива с защитой от распространения пламени в обратном направлении, камеру с улучшенной изоляцией, с колосниковой решеткой (обычно с параллельным потоком) и отдельный котельный модуль. В камере с улучшенной изоляцией (которую называют предварительной топкой или предварительной печью), в которую вентилятором подается первичный воздух, происходит сжигание или частичная газификация топлива. Топливо сжигается небольшими дозами. С помощью вторичного воздуха топливные и топочные газы подаются через фланец в котельный модуль. В установке такой конфигурации окисление происходит в котельном модуле перед поступлением горячих газов в теплообменник. Таким образом, в двухкамерных топках зоны пиролиза и газификации и зона окисления в большей степени разделены в пространстве, чем в других установках, предназначенных для сжигания топлива [22].

Имеется возможность создания турбулентных зон в трубе топочного газа, что позволяет дополнительно улучшить смешение воздуха горения и таким образом повысить степень выгорания топлива. Вместе с тем недостаточная тепловая изоляция может быть причиной повышения тепловых потерь. Предварительную топку можно соединить с действующим котлоагрегатом, что является экономичным решением задачи конверсии котла на ископаемом топливе (мазуте, дизельном топливе или природном газе).

В табл. 1.3 представлены основные характеристики топок для сжигания отходов деревообработки.

Таблица 1.3

*Основные характеристики топок для сжигания отходов
деревообработки*

Тип	Диапазон мощности, МВт	Вид топлива	Выход золы	Влажность
Топка с нижней подачей топлива	0,20 - 2.5	Древесная щепа, древесные отходы	<2%	5%-50%
Двухкамерная топка	0,20 - 1.5	Сухая древесина (лесосечные отходы)	<5%	5%-35%
Топка с подвижной решеткой	0,150 - 15	Все виды древесного топлива; большая часть биомассы	<5%	5%-60%
Топка с нижней подачей топлива с вращающейся решеткой	2-5	Древесная щепа, с высокой влажностью	<5%	40%-65%
Топка с кипящим слоем	5-15	Различные виды биомассы,	<5%	5%-60%

		d < 10 мм		
Топка с циркулирующим кипящим слоем	15-100	Различные виды биомассы, d < 10 мм	<5%	5%-60%
Топка для пылевого сжигания в потоке	5-10	Различные виды биомассы, d < 5 мм	<5%	<20%

Основным способом повышения КПД топочных устройств является подсушка биомассы, которая обычно обеспечивает умеренное повышение КПД и снижение затрат [219]. Предполагаемый процесс подсушки биомассы следует подвергнуть тщательному анализу с целью определения возможной экономической выгоды с учетом дополнительных инвестиционных и эксплуатационных затрат, включая затраты на электроэнергию, а также человеко- и машино-часы, необходимые для обслуживания процесса. В большинстве случаев подсушка биомассы экономически оправдана только тогда, когда имеется дешевый подогретый воздух. В табл. 1.4 приведены возможные варианты повышения КПД установок, предназначенных для сжигания биомассы.

Эффективной мерой повышения эффективности установки сжигания является снижение содержания избыточного кислорода в топочном газе. Существует два технологических варианта снижения коэффициента избытка воздуха с одновременным обеспечением полного сгорания топлива. Одним из таких вариантов является установка кислородного датчика, соединенного с датчиком окиси углерода в потоке топочного газа на выходе из котла, с целью оптимизации подачи вторичного воздуха [197].

Таблица 1.4.

Влияние различных мер на повышение теплового КПД установок

№ п/п	Меры	Потенциальное повышение теплового КПД
1	Подсушка со снижением влажности с 50 до 30 %	+8,7%
2	Снижение содержания O ₂ в топочном газе на 1 %	Около +0,9%
3	Снижение содержания золы с 10,0 до 5,0 %	+0,3%
4	Снижение температуры топочного газа на выходе из котла на 10 °С	+0,8%
5	Конденсация топочного газа	Среднее +17%; максимальное +30%

Второй вариант предусматривает повышение качества смешения топочного газа с воздухом топки. Кроме того, снижение концентрации избыточного кислорода в топочном газе также позволяет значительно повысить КПД устройств конденсации газа, так как такое снижение повышает значение точки росы и, следовательно, увеличивает количество скрытой теплоты в конденсационной воде, которая может быть утилизирована при определенной температуре.

Путем снижения концентрации избыточного кислорода в топочном газе снижается объем топочного газа, что позволяет уменьшить размеры котлоагрегатов и скрубберов топочного газа [189]. При этом необходимо обеспечить, чтобы снижение концентрации избыточного кислорода в топочном газе сопровождалось повышением температуры горения, а это, в свою очередь, требует использования эффективной системы контроля температуры в топке.

Наиболее эффективным и во многих случаях экономически оправданным методом утилизации энергии топочного газа является метод его конденсации. Кроме того, что этот процесс обладает высоким потенциалом утилизации энергии (до 20% от потребленной энергии топливной биомассы по отношению к НТС), он также обеспечивает высокую степень осаждения пыли (40-75%) и позволяет предотвратить конденсирование топочного газа на

поверхности дымовой трубы при температуре окружающей среды до - 10°C. Количество теплоты, которое может быть утилизировано из топочного газа, зависит от влажности топливной биомассы, количества избыточного кислорода в топочном газе и температуры воды в обратном трубопроводе. Чем ниже температура оборотной воды, тем больше количество латентной теплоты, которая может быть утилизирована, когда топочный газ охлаждается ниже точки росы. Следовательно, потенциал утилизации энергии в значительной степени зависит от качества теплообменников, конструкции гидравлических систем и характеристик систем управления технологическим процессом, которые определяют температуру оборотной воды.

Основной недостаток процесса сжигания в том, что не обеспечивается экологическая чистота процесса, так как при сгорании отходов, загрязненных различными полимерными включениями, происходит выделение с топочными газами в атмосферу различных токсичных и высокотоксичных веществ. Все это приводит к необходимости внедрения дорогостоящих систем очисток, что экономически нецелесообразно.

1.2.2. Пирогенетическая переработка отходов ЛПК

Под пирогенетической переработкой древесины понимают процесс ее распада под действием высокой температуры без доступа кислорода. В научной литературе наряду с названием «пирогенетическая переработка древесины» применяют термины: «пиролиз древесины», «углежжение», «сухая перегонка», «термическое разложение древесины» [246, 123].

При термическом распаде древесины образуются древесный уголь, жидкие и газообразные продукты (табл. 1.5). Продукты выходят из горячей зоны частично в капельной фазе, частично в виде паров, образуя вместе с неконденсирующимися газами парогазовую смесь. Этот процесс не может быть описан однозначно.

Таблица 1.5

Выход продуктов пиролиза древесины и коры основных произрастающих в РФ пород (усредненные данные)

Порода	Сырье	Уголь	Массовые доли продуктов пиролиза абсолютно сухой древесины, %			
			Смолы	Легко-летучие компоненты	Газы	Вода разложения
Ель	Древесина	37,9	15,3	6,3	18,2	22,3
	Кора	42,5	18,4	1,9	19,8	17,4
Сосна	Древесина	38,0	16,7	6,2	17,7	21,4
	Кора	40,5	18,2	5,7	19,7	15,9
Береза	Древесина	33,6	14,3	12,3	17,0	22,8
	Кора	37,9	24,0	4,7	18,6	14,8
Осина	Древесина	33,0	16,0	7,3	20,4	23,3

На результаты влияет скорость нагрева, продолжительность пребывания сырья при той или иной температуре, конечная температура нагрева, а также начальная влажность, размеры частиц древесины, скорость циркуляции газового потока через слой древесины и другие факторы. Одновременно с первичным распадом древесины протекают разнообразные вторичные реакции. Некоторые из них приводят к дополнительному расщеплению продуктов распада, другие - к полимеризации первичных продуктов. Состав итоговых продуктов во многом зависит от времени пребывания образовавшейся при первичном распаде парогазовой смеси в горячей зоне. Если рассматривать общие тенденции термораспада, то можно утверждать, что, чем продолжительнее процесс и чем выше температура, тем больше образуется термически устойчивых продуктов - ароматических соединений, углекислого газа, окиси углерода, метана [106].

Режим пиролиза определяющим образом влияет на выход и состав продуктов, но при прочих равных условиях выход зависит

от породы перерабатываемой древесины и части дерева, подверженной пиролизу (см. табл. 1.4). В промышленном производстве выход угля часто бывает заметно меньше, чем приведенный в табл. 1.4. Самые распространенные причины - это попадание кислорода воздуха в аппарат, вследствие чего происходит выгорание части угля, а также особенности режима и потери при перегрузках, исключение из баланса отсеянной угольной пыли.

Различают четыре стадии процесса пиролиза:

- 1) Сушка. Температура не выше 150 °С. Процесс эндотермический.
- 2) Распад гемицеллюлоз, отщепление части химически связанной воды, образование CO, CO₂, метана, уксусной кислоты, метанола. Температура 150-275 °С. Процесс эндотермический.
- 3) Распад целлюлозы и лигнина. Вторичные реакции полимеризации. Образование основного количества смолы. Температура 275-450 °С. Процесс экзотермический. Особенно сложен для управления и контроля.
- 4) Прокалка угля. Удаление из углеродного скелета остатков летучих веществ, удерживаемых адсорбционно. Формирование углеродных кристаллоидных структур. Отщепление функциональных групп, удерживаемых углеродом. Температура 400-450°С. Параллельно идут эндотермические и экзотермические реакции. Суммарный баланс эндотермический.

Уголь, прокаленный до 500 °С, не является чистым углеродом. Если прокалку продолжать, то и при 600 °С будут выделяться углеводороды (метан, этан, этилен и др.), а при 700-950 °С - в основном водород [77]. Меняется и структура угля: от него отщепляются функциональные группы, содержащие кислород и водород, изменяются связи между атомами углерода. Однако для большинства направлений потребления качественным считается уголь, прокалка которого завершена при 450-550 °С (рис. 1.4). При очень высоких давлениях и температурах происходит постепенное превращение углерода в кристаллическую структуру. Этот процесс положен в основу технологии производства искусственных алмазов.

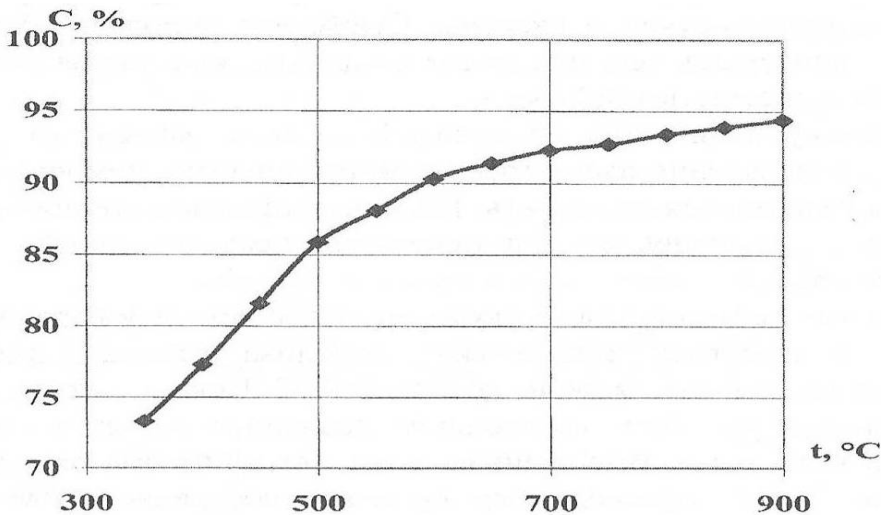


Рис. 1.4. Зависимость содержания углерода в коксовом остатке от температуры прокаливания

В процессе пиролиза выделяются окись и двуокись углерода, газообразные углеводороды (предельные и непредельные), водород, вода (не только влага древесины, но и продукт химического распада ее компонентов), кислоты (муравьиная, уксусная и в небольшом количестве высшие кислоты того же ряда), метанол, кетоны, эфиры. Все эти вещества удаляются в форме парогазовой смеси. В ней в капельной фазе (в форме тумана) находятся и смолистые вещества. Эти смолистые вещества по признаку растворимости в водном конденсате из парогазовой смеси (жидке) делятся на растворимую и отстойную смолы. Растворимая часть в основном состоит из осколков целлюлозы и гемицеллюлоз углеводного и углеводородного характера, но содержит и простейшие фенолы, растворимые в жидке, кислоты. Отстойная смола получается главным образом за счет распада лигнина и содержит вещества фенольного характера, нейтральные соединения различной структуры, кислоты.

Темпы выделения разных компонентов различны. Первыми выделяются те вещества, которые образуются за счет отщепления боковых цепей полимеров древесины и распада термически непрочных ее компонентов (камеди, гемицеллюлозы и т.д.). В последнюю очередь разрушается лигнин. Распад имеет характер