

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Программа «Энергетическая стратегия России на период до 2020 года». Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации № 1234-р от 28 августа 2003 года // Официальный сайт Министерства промышленности и торговли РФ. [2004–2010]. Дата обновления: 06.10.2005. URL: <http://www.minprom.gov.ru/docs/strateg/1> (дата обращения: 24.10.2011).
2. Стратегия в области электроэнергетики // Официальный сайт ОАО «Газпром». [2003–2011]. Дата обновления: 24.10.2011. URL: <http://www.gazprom.ru/strategy/energetics/> (дата обращения: 24.10.2011).
3. Томская область. Общая информация о регионе // Официальный интернет портал Администрации Томской области [1998–2011]. Дата обновления: 24.10.2011. URL: http://tomsk.gov.ru/gu/tomsk_region/ (дата обращения: 24.10.2011).
4. Смольянинов С.И., Маслов С.Г. Термобрикети́рование торфа. – Томск: Изд-во ТГУ, 1975. – 108 с.
5. Булышко М.Г. Иванов В.Н. Сарматов М.И. Брикетирование торфа. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 303 с.
6. Способ изготовления брикетного топлива: пат. 2375414 Рос. Федерация. № 2008135644/04; заявл. 02.09.08; опубл. 10.12.09.
7. Инишева Л.И. Торфяные ресурсы Томской области и их использование. – Новосибирск: Б.и., 1995. – 88 с.
8. Бардашова Н.В., Беккер Е.Г. Исследование топливных характеристик брикетного образца // Современные техника и технологии: Сб. трудов XVII Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3-х т. – Т. 3. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – С. 189–190.
9. Казаков А.В., Табакаев Р.Б., Плахова Т.М. Влияние связующих веществ на прочностные свойства топливных брикетов из торфа // Теплофизические основы энергетических технологий: Сб. научных трудов II Всероссийской научно-практ. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – С. 222–225.

Поступила 20.02.2012 г.

УДК 662.76

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ

Г.В. Кузнецов, Р.Н. Кулеш, М. Полсонгкрам

Томский политехнический университет
E-mail: marisha@tpu.ru

Проведены экспериментальные исследования закономерностей термического разложения шести разновидностей древесной биомассы в диапазоне изменения температур до 600 °С при различных скоростях нагрева материалов. Установлено, что выход твёрдых (углистое вещество), жидких (биотопливо) и газообразных (биогаз) продуктов почти не зависит от темпа нагрева. Полученные результаты являются основой для разработки мероприятий по повышению энергоэффективности технологических процессов термической конверсии биомассы. Установлена общность зависимостей глубины термических превращений от температуры и темпа нагрева, существенно отличающихся по своей структуре, условиям роста и исходным характеристикам разновидностей древесной биомассы.

Ключевые слова:

Медленный пиролиз, древесная биомасса, термическое разложение, темп нагрева, углистое вещество, биотопливо, биогаз.

Key words:

Slow pyrolysis, woody biomass, thermal decomposition, rate of heating carbonaceous material, biofuel, biogas.

Введение

Известно [1], что использование древесной биомассы является, возможно, самым перспективным направлением развития биоэнергетики, которая, в свою очередь, небезосновательно считается многими экспертами [2, 3] самым реальным возобновляемым источником электрической и тепловой энергии для многих территорий. Кроме того древесная биомасса является хорошим сырьем для получения жидкого биотоплива, биогаза и углистого вещества, диапазон возможных областей применения которого очень высок [1]. Но, несмотря на повышенное (по сравнению с другими энергоресурсами) внимание исследователей и инженеров на многих континентах [2–5], до настоящего времени нет примеров широкомасштабного применения древесной биомассы как непосредственно в энергетике, так и в производстве вторичных энергоносителей (биотопливо, биогаз).

Скорее всего, такое состояние работ по прямому или косвенному использованию древесины в энергетике обусловлено объективными причинами, основной из которых является отсутствие достаточной для промышленной реализации научно-технической проработки процессов термической конверсии такой биомассы. Так, например, не выполнены до настоящего времени оценки энергоэффективности технологий медленного пиролиза древесной биомассы в наиболее типичных диапазонах изменения температур. Установлены по группе типичных разновидностей этого сырья основные закономерности процессов термического разложения [6, 7], но не изучено влияние темпа нагрева биомассы на состояние конечных продуктов термической конверсии.

Известно [2], что скорость нагрева – один из параметров, определяющих выход продуктов во время процесса пиролиза. При низкой скорости

нагрева достаточно велико сопротивление переносу массы или тепла внутри образца. Увеличение скорости нагрева позволяет интенсифицировать процессы переноса тепла и массы, а также увеличить выход газа и жидкости при одновременном уменьшении твердых образований. Анализ влияния этого фактора представляет особый интерес и потому, что, как показали экспериментальные исследования [6, 7], процесс медленного пиролиза биомассы является достаточно энергоемким. На реализацию термической конверсии единицы массы древесины, например, до 600 °С в течение нескольких десятков минут (до часа) необходимо нагревать образец (находящийся в реакторе) до этой температуры. Но затраты энергии с ростом линейных размеров образца биомассы L увеличиваются пропорционально L^3 , даже если не рассматривать энергозатраты на предварительную сушку сырья до полного удаления влаги. В этой связи увеличение скорости нагрева древесины, например, с 10 до 50 °С·мин⁻¹ может быть очень энергоэффективным мероприятием при условии сохранения состава и качества конечных продуктов процесса регулируемого термического разложения древесной биомассы.

Целью настоящей работы является экспериментальное изучение влияния темпа нагрева образцов древесной биомассы на состав конечных продуктов медленного пиролиза в диапазоне температур нагрева до 600 °С.

Методика и результаты экспериментов

Экспериментальные исследования проведены с использованием шести разновидностей древесной биомассы: *Leucaena leucosephala*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Acacia mangium willd*, *Jatropha curcas* Linn, *Acacia auriculaeformis*, а также *Pinus sibirica* (сибирской кедр). Изучены пять видов древесины, широко распространенной в Тайланде и используемой в качестве топлива. Для этого государства характерной является тенденция роста объемов производства электрической и тепловой энергии с использованием биомассы. Для обобщения результатов экспериментов на виды биомассы других регионов проведены исследования процессов термического разложения сосны, распространенной на территории Сибири.

Эксперименты по методике [6, 7] проведены с целью установления влияния скорости нагрева на выход продуктов пиролиза. Согласно методике пробы древесины разрезались на составляющие (характерные размеры 1...5 мм длиной и менее чем 0,5 мм толщиной) с целью минимизации сопротивления тепло- и массопереносу внутри частицы, затем высушивались в печи в течении 3 часов при 110 °С с целью удаления влаги. При проведении опытов регистрировалось изменение веса образцов при различных температурах. Все эксперименты включали три основных этапа: сушка, удаление летучих в нейтральной среде, сжигание в кислороде. Экспериментальная установка представляла собой

комплекс на базе реактора для атмосферного пиролиза (реактор, конденсатор, конденсатосборник и источник гелия). Гелий подводился с целью замещения воздуха для поддержания нейтральной среды внутри реактора. Образцы древесной биомассы исследовались при скоростях нагрева 10 и 50 °С·мин⁻¹ при различных конечных температурах пиролиза (от 250 до 600 °С). Результаты исследования представлены на рисунке.

Установлено, что при изменении температуры от 250 до 600 °С выход углистого вещества уменьшился с 75,2 до 29,5 % при пиролизе древесины *Leucaena leucosephala*; с 75,6 до 29 % – древесины *Eucalyptus camaldulensis*; с 77,2 до 33 % – древесины *Acacia mangium willd*; с 64 до 31,5 % – древесины *Jatropha curcas* linn; с 83,2 до 30,5 % – древесины *Acacia auriculaeformis*; и с 82 до 27 % при пиролизе древесины сосны. Изменение скорости нагрева от 10 до 50 °С·мин⁻¹ приводит к изменению выхода твердых продуктов на 2...5 %. Это может быть связано с тем, что быстрое нагревание приводит к более быстрой деполимеризации твердого вещества с образованием летучих веществ, в то время как при низкой скорости нагревания деструкция проходит более стабильно, и образование гидратцеллюлозы проходит медленно и является ограниченным [2]. В целом можно сделать вывод о том, что увеличение скорости нагрева в 5 раз приводит к изменению доли выхода углистого вещества не более чем на 5 %.

В приведенных экспериментах выход жидкости при низкой скорости нагрева составлял от 42 до 46,5 % и слабо увеличивался с её ростом до 50 °С·мин⁻¹ с 44 до 46,5 % при пиролизе древесины *Leucaena leucosephala*, с 42 до 46 % при пиролизе древесины *Eucalyptus camaldulensis*, с 41,5 до 42,5 % при пиролизе древесины *Acacia mangium willd*, с 33,5 до 33,51 % при пиролизе древесины *Jatropha curcas* linn, с 41 до 42,5 % при пиролизе древесины *Acacia auriculaeformis*; и с 44 до 46 % при пиролизе древесины сосны (конечная температура экспериментов 600 °С). Повышение выхода пироожидкости из биомассы *Jatropha curcas* linn было даже менее интенсивным по сравнению с другими видами древесины. В целом отклонения в выходе жидких продуктов пиролиза с ростом скорости нагрева изменялись незначительно.

Выход газа также незначительно увеличился с ростом скорости нагрева и составил от 21 до 32,5 % (10 °С·мин⁻¹) и увеличился до 24...35 % (50 °С·мин⁻¹) при пиролизе всех видов биомассы (рисунок). Небольшое увеличение выхода жидкости и газа с повышением скорости нагревания может быть вызвано устранением барьеров для переноса массы и тепла в частицах.

При проведении всех экспериментальных исследований выполнялась оценка погрешностей результатов. С этой целью все опыты при фиксированных основных факторах (температура завершения эксперимента, вид биомассы, размеры образцов, их вес и др.) проводились не менее

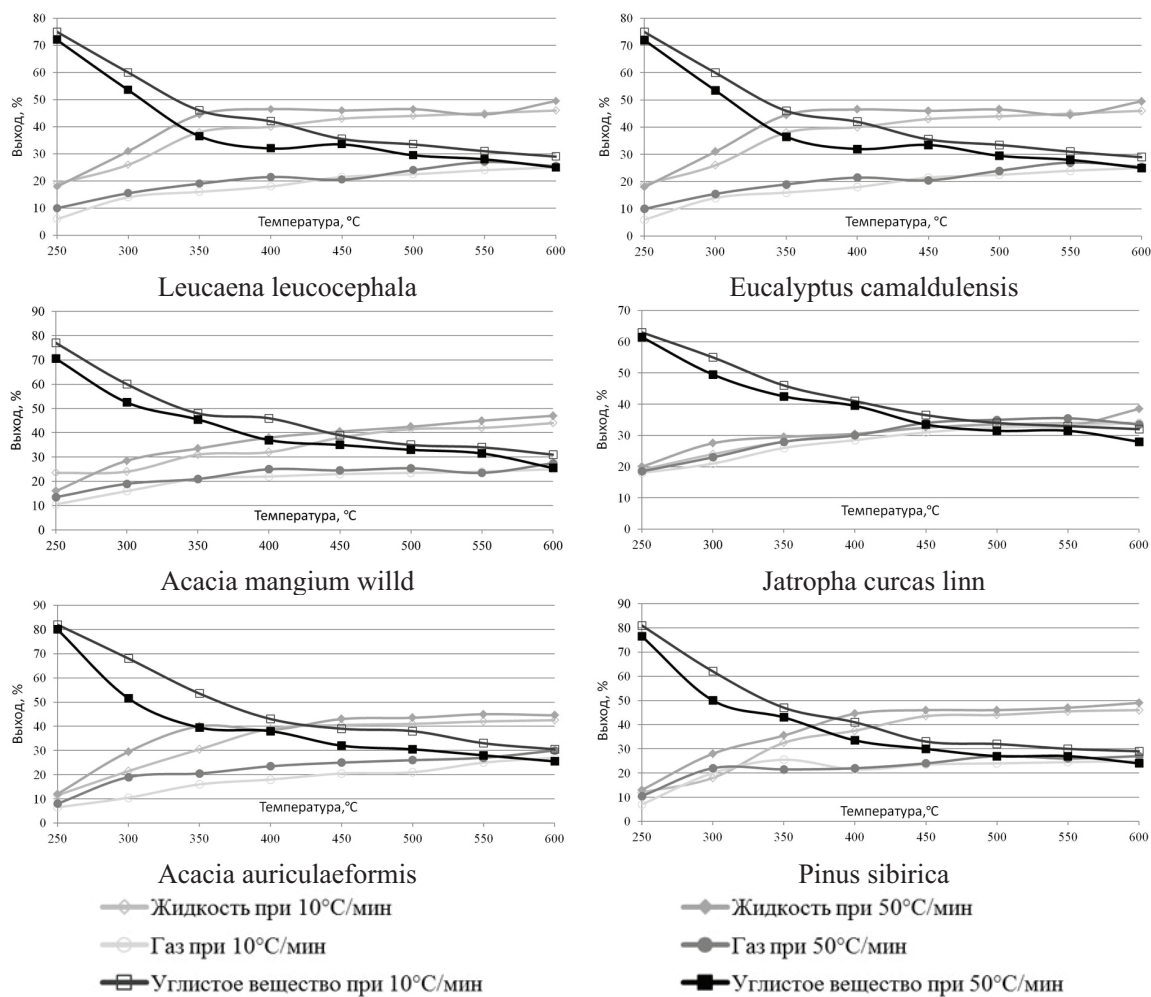


Рисунок. Влияние скорости нагрева на выход продуктов пиролиза древесины

трех раз подряд. Соответственно, по итогам каждой такой серии экспериментов рассматривались осредненные значения каждой определяемой в эксперименте величины массового выхода исходного продукта при адекватных исходных данных и внешних условиях, затем вычислялись значения среднеквадратичных отклонений и их безразмерные величины (коэффициенты вариации). В таблице приведены типичные полученные значения, а также значения отклонений (материала *Leucaena leucocephala*) для выхода жидких, твердых и газообразных продуктов в рабочем диапазоне изменения конечных температур термических превращений. Для других видов древесной биомассы были получены сопоставимые с представленными в таблице характеристики рассеяния экспериментальных данных.

Анализ таблицы и рисунка показывает, что отклонения результатов изменения выхода конечных продуктов всех исследованных материалов при изменении скорости нагрева от 10 до 50 °C·мин⁻¹ и погрешности экспериментального определения этих величин незначительно отличаются. Можно сделать заключение о том, что в наиболее перспективном диапазоне изменения температур термиче-

ской конверсии древесной биомассы скорость нагрева не влияет на состав конечных продуктов термической конверсии. Т. е. технологии получения угlistого вещества, жидкого биотоплива и биогаза возможно разрабатывать в достаточно широком диапазоне варьирования скоростей нагрева древесной биомассы с сохранением стабильного выхода конечных жидких, твердых и газообразных продуктов.

Таблица. Величина массового выхода конечного продукта древесины *Leucaena Leucoscephala* в зависимости от температуры *T* и погрешность ее определения при 10 °C·мин⁻¹, %

T, °C	Продукты		
	Жидкие	Твердые	Газообразные
250	19,00±1,99	75,00±2,19	6,00±0,45
300	26,00±1,56	60,00±1,95	14,00±0,86
350	38,00±1,88	46,00±1,95	16,00±0,65
400	40,00±1,73	42,00±1,78	18,00±0,73
450	43,00±1,60	35,50±1,57	21,50±0,95
500	44,00±1,56	33,50±1,54	22,50±0,92
550	45,00±1,65	31,00±1,64	24,00±0,98
600	46,00±1,68	29,00±1,55	25,00±1,01

Полученный результат позволяет сделать вывод о возможности существенного снижения энергозатрат на реализацию технологий медленного пиролиза биомассы. Так, например, увеличение темпа нагрева сырья при переработке древесных отходов в два раза может создать предпосылки для снижения энергозатрат на 35...40 % при реализации самых простейших технологических схем нагрева биомассы.

Следует также отметить, что по своим исходным свойствам, структуре, условиям роста и географии распространения исследованные материалы отличаются достаточно существенно. Соответственно, на основании результатов проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод и о возможности обобщения полученных данных и на другие разновидности древесной биомассы. Т. е. оценка влияния скорости нагрева сырья на выход продуктов для других видов древесной биомассы может быть проведена при существенно меньшем числе экспериментов для аналогичного диапазона температур конверсионного цикла.

Результаты экспериментов также можно использовать в качестве базы для развития моделей процессов, протекающих при нагреве древесины до высоких температур. Дальнейший анализ моделей этих процессов термической конверсии дре-

весной биомассы может создать объективные предпосылки для разработки энергоэффективных технологий биоэнергетики и переработки древесной биомассы.

Заключение

1. Проведены эксперименты по исследованию влияния скорости нагрева на выход продуктов пиролиза различных видов древесной биомассы.
2. Определено, что при изменении конечной температуры от 250 до 600 °С выход углистого вещества для исследованных пород древесины снижается на 32,5...55 %.
3. Установлено, что изменение скорости нагрева от 10 до 50 °С·мин⁻¹ незначительно влияет на выход продуктов термической конверсии древесной биомассы и приводит к увеличению выхода твердых продуктов на 2...5 %.
4. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности существенного снижения энергозатрат на реализацию технологии медленного пиролиза древесной биомассы. Так, например, увеличение темпа нагрева сырья при переработке древесных отходов в два раза может создать предпосылки для снижения энергозатрат на 35...40 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головкин С.И., Коперин И.Ф., Найденов В.И. Энергетическое использование древесных отходов. – М.: Лесная промышленность, 1987. – 224 с.
2. Железня Т.А., Гелетуа Г.Г. Современные технологии получения жидкого топлива из биомассы быстрым пиролизом // Промышленная теплотехника. – 2005. – Т. 27. – № 4. – С. 91–100.
3. Bridgwater A.V. The Status of Fast Pyrolysis of Biomass in Europe // Proc. of the 10th European Bioenergy Conference. Wurzburg, Germany, 8–11 June 1998. – Carmen, 1998. – P. 268–271.
4. Bridgwater A.V., Peacock V.C. Fast pyrolysis for biomass // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2000. – № 4. – P. 1–73.
5. Bramer E.A., Holthuis M.R., Brem G. Development of a cyclone reactor with internal particle filter for the flash pyrolysis of bio-

mass // Proc. of the II World Biomass Conf. – Rome. – Italy, 10–14 May 2004. – Munich: ETA-Florence and WIP, 2004. – P. 963–966.

6. Кузнецов Г.В., Полсонграм М. Зависимость состава продуктов пиролиза древесной биомассы от режима теплового воздействия // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. – № 1. – С. 125–129.
7. Кузнецов Г.В., Полсонграм М. Влияние режима теплового воздействия на состав продуктов пиролиза древесной биомассы // Бутлеровские сообщения. – 2011. – Т. 25. – № 7. – С. 101–104.

Поступила 20.02.2012 г.