

УДК 634.0.867

А.Н. Грачев, Р.Г. Сафин, Р. Г. Хисматов, А.А. Макаров

Казанский государственный технологический университет

Грачев Андрей Николаевич родился в 1979 г., окончил в 2001 г. Казанский государственный технологический университет, кандидат технических наук, докторант кафедры переработки древесных материалов КазГТУ. Имеет более 60 печатных работ в области тепломассообмена, быстрого пиролиза, газификации, энергетического использования биомассы.

E-mail: andri@hitv.ru



Сафин Рушан Гареевич родился в 1950 г., окончил в 1973 г. Казанский химико-технологический институт, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой переработки древесных материалов Казанского государственного технологического университета. Имеет более 200 печатных работ в области исследований тепломассообменных процессов, разработки технологических процессов, протекающих при понижении давления, энергосберегающих, безотходных технологий и оборудования.

E-mail: andri@hitv.ru



Хисматов Рустам Габдулнурович родился в 1985 г., окончил в 2007 г. Казанский государственный технологический университет, аспирант кафедры переработки древесных материалов КазГТУ. Имеет 5 печатных работ в области исследования процесса быстрого абляционного пиролиза древесины.

E-mail: xp8519@rambler.ru



Макаров Александр Александрович родился в 1986 г., студент Казанского государственного технологического университета. Область научных интересов: исследование процесса быстрого абляционного пиролиза древесины.

E-mail: makar3325@rambler.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СКОРОСТИ УБЫЛИ МАССЫ ДРЕВЕСИНЫ В ПРОЦЕССЕ БЫСТРОГО АБЛЯЦИОННОГО ПИРОЛИЗА *

Исследована скорость убыли массы древесины в процессе быстрого абляционного пиролиза древесины; определены зависимости скорости контактного абляционного пиролиза древесины сосны от температуры, силы и скорости механического воздействия на образец.

Ключевые слова: быстрый абляционный пиролиз, экспериментальные исследования, скорость убыли массы.

В настоящее время в связи с ростом цен на ископаемые энергоресурсы получение энергии из биомассы является одним из наиболее динамично развивающихся направлений для многих стран мира. Наряду с сжиганием и газификацией, быстрый пиролиз – перспективная и наименее проработанная

* Исследования выполнены при содействии гранта Президента РФ для поддержки молодых российских ученых № МК-5209.2007.8.

технология энергетического использования биомассы [1]. Она позволяет обеспечить термохимическую переработку до 80 % исходной массы древесины в жидкие продукты [2], которые вызывают большой интерес вследствие высокой энергетической плотности и возможности их использования в качестве жидкого топлива [9].

Процесс быстрого пиролиза заключается в термическом разложении органических соединений биомассы в отсутствие окислителя, при относительно низких температурах (450...550 °С), высокой скорости нагрева (500...1000 °С/с) и незначительном времени пребывания продуктов в реакционном пространстве (до 2...3 с) [9]. В результате этого образуются углистый остаток и парогазовая смесь, которую впоследствии разделяют на жидкие продукты и неконденсируемый газ. В большинстве случаев для обеспечения требуемых режимных параметров процесса и высокого выхода жидких продуктов необходимо измельчать исходное сырье до минимальных (1...2 мм) размеров, что сопряжено с дополнительными затратами.

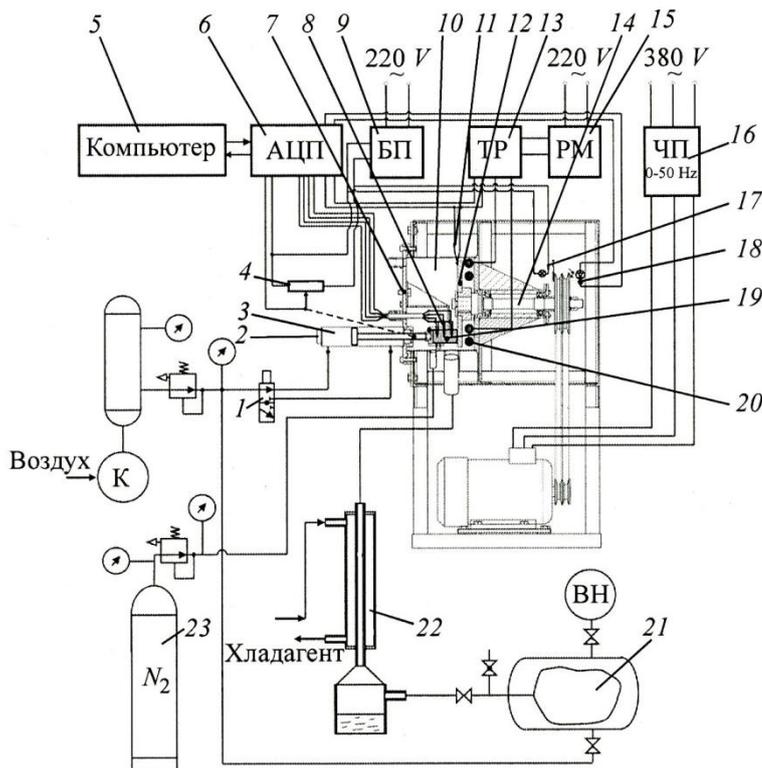


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для исследования быстрого абляционного пиролиза

Высокий выход жидких продуктов пиролиза из исходного сырья большего размера (более 10 мм) можно получить при пиролизе древесины в

абляционном режиме [4]. В случае абляционного быстрого пиролиза происходит механическое удаление (унос) прореагировавшего продукта, что приводит к интенсификации процесса за счет снижения термического и диффузионного сопротивления [5]. Практический интерес представляет кинетика быстрого абляционного пиролиза [5–7].

Цель нашей работы – определить зависимости изменения скорости абляции при быстром механоактивированном пиролизе древесины сосны от температуры процесса, скорости и силы механического воздействия на зону термического разложения.

Экспериментальные исследования кинетики процесса быстрого абляционного пиролиза древесины осуществляли на стенде, схема которого представлена на рис. 1. Экспериментальный стенд включает: реакционную камеру 10, систему пневматической подачи образца, систему управления и регистрации данных, конденсатор 22, газгольдер 21 и баллон с инертным газом 23. Реакционная камера содержит вращающийся в вертикальной плоскости на валу 14 диск 12. Параллельно поверхности диска в реакционной камере установлен трубчатый электронагреватель 20. Герметизация реакционной камеры осуществляется крышкой 7, состоящей из держателя образца 3, выводов для проводов измерительных устройств, потенциометра 4 и пневмоцилиндра 2. Испытуемый образец 19 закрепляют в держателе. Перемещение держателя и создание заданного контактного усилия на его поверхности осуществляется с помощью системы пневматической подачи образца. Система управления и регистрации данных включает: частотный преобразователь 16, регулятор мощности 15, терморегулятор 13, блок питания 9, аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) 6, компьютер 5, термоэлектрические преобразователи (термопары) 8 и 11, потенциометр, фото- 18 и светодиоды 17. Фиксацию экспериментальных данных осуществляют в дискретном режиме с помощью АЦП, который работает под управлением программного обеспечения компьютера. Полученные данные сохраняются в базе данных компьютера. Дальнейшая обработка сохраненных экспериментальных данных позволяет сделать заключение об изменении режимных параметров процесса во времени. Зависимость линейного перемещения испытуемого образца во времени, как и изменение его размеров, фиксируется изменением разности потенциалов на контактах потенциометра. Регистрация мгновенных значений частоты вращения диска обеспечивается подключением к АЦП фотодиода, который освещается светодиодом.

Варьируемые в ходе исследований факторы – температура диска, давление в нагнетательной камере пневмоцилиндра и частота вращения диска. В ходе исследований температуру диска изменяли в диапазоне 450...700 °С, давление – от 2 до 5 атм. Значение удельного давления в зоне термического разложения образца $P_{обр}$ определяли с помощью уравнения

$$P_{обр} = \frac{P_{пн} S_{пн}}{S_{обр}},$$

где $P_{пн}$ – давление сжатого воздуха в нагнетательной линии пневмо-

цилиндра, атм;

$S_{\text{пн}}$ и $S_{\text{обр}}$ – площадь поршня пневмоцилиндра и поперечного сечения образца, м^2 .

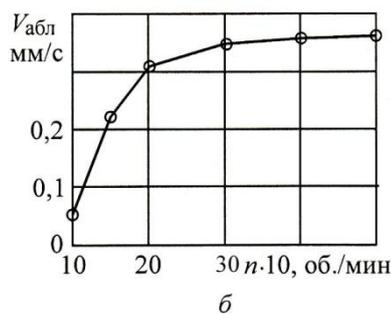
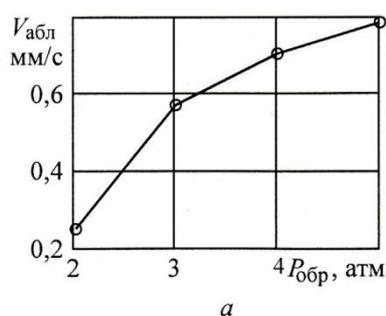
Частоту вращения диска n предварительно устанавливали с помощью частотного преобразователя в диапазоне 100...500 об./мин, в ходе обработки полученных данных ее уточняли. При этом средняя линейная скорость смещения диска относительно образца v (м/с) в зависимости от n (об./мин)

$$v = \frac{2\pi n R}{60},$$

где R – расстояние от оси диска до центра сечения образца, м.

Эксперимент осуществляли следующим образом. В течение 30 мин электронагревателем прогревали реакционную камеру до достижения стационарного режима при заданной температуре диска. В ходе прогрева реакционной камеры, чтобы исключить перегрев крышки, на ее место устанавливали теплоизолированную заглушку. Предварительно подготовленный образец размерами 25×25×40 мм (абсолютная влажность 8 %) закрепляли в держателе с помощью затяжного винта. При достижении заданной температуры диска вместо теплоизолированной заглушки в реакционную камеру устанавливали крышку, обеспечивая герметизацию камеры. После герметизации реакционную камеру кратковременно продували инертным газом из баллона, включали электродвигатель при заданной частоте вращения диска, линию циркуляции хладагента конденсатора, АЦП в режиме сбора данных и устанавливали требуемое давление на линии нагнетания пневмоцилиндра. Эксперимент начинали после включения пневмораспределителя 1, при этом образец с заданным усилием подавали на вращающийся диск. Образующуюся в реакционной камере парогазовую смесь направляли в конденсатор, где происходил процесс конденсации паров, неконденсирующиеся газы – в газгольдер. Эксперимент заканчивали при достижении держателем образца поверхности диска путем прекращения подачи сжатого воздуха в нагнетательную камеру пневмоцилиндра. В ходе эксперимента данные с термомпар, потенциометра и фотодиода фиксировали АЦП и сохраняли в виде файлов в компьютере. В дальнейшем данные обрабатывали: селективно выделяли из общего массива интересующей области эксперимента, фильтруя и сглаживая их, дифференцировали значения и определяли линейную скорость абляционного пиролиза $V_{\text{абл}}$.

Результаты исследования представляли в виде графических зависимостей (рис. 2).



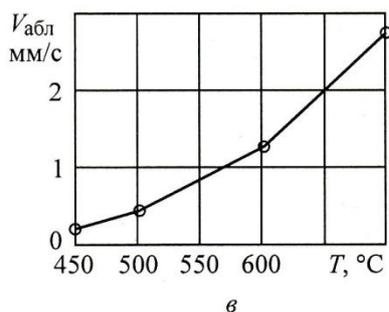


Рис. 2. Экспериментальные зависимости скорости абляционного пиролиза от давления (а), частоты вращения диска (б) и температуры (в)

Экспериментальные зависимости скорости абляционного пиролиза от давления получены в процессе пиролиза сосновых образцов при постоянных температуре (500 °С) и частоте вращения диска (180 об./мин). Как видно из рис. 2, а, увеличение давления оказывает значительное влияние на скорость процесса, что можно объяснить уплотнением зоны термического разложения, приводящим к росту коэффициента ее теплопроводности, улучшению условий эвакуации парогазовой смеси из зоны реакции путем выдавливания, более совершенному тепловому контакту на границе раздела фаз и выдавливанию готового продукта. Экспериментальная кривая скорости абляции в исследуемом диапазоне давлений показывает хорошее согласование со степенной функцией с незначительным снижением влияния давления на скорость пиролиза.

На рис. 2, б представлена экспериментальная зависимость скорости абляционного пиролиза от частоты вращения диска, полученная при постоянных значениях температуры диска (500 °С) и давления (2 атм). Как видно из данной зависимости, скорость абляционного пиролиза значительно увеличивается в диапазоне изменения частоты вращения диска до 220 об./мин, что соответствует средней линейной скорости смещения диска относительно образца 1,43 м/с. Дальнейшее увеличение частоты вращения диска приводит к стабилизации скорости абляционного пиролиза на уровне 0,35... 0,37 мм/с. Это можно объяснить наличием двух принципиально различных режимов абляционного пиролиза.

При низких частотах вращения диска (и низких скоростях смещения диска относительно образца) над зоной термического разложения образуется зона уплотненного готового продукта, которая приводит к значительному лимитированию скорости пиролиза. Поэтому при незначительном увеличении скорости смещения диска относительно образца происходит значительная интенсификация процесса вследствие механического сдвига и уноса зо-

ны готового продукта. При этом кривая абляции имеет вид степенной функции с показателем степени менее единицы.

В опытах, где скорость смещения диска относительно образца превышает 1,43 м/с, толщина зоны термического разложения минимальна (стремится к нулю), и процесс лимитируется кондуктивным подводом теплоты к зоне реакции, теплопроводностью древесины, скоростями реакций разложения и отвода продуктов. При этом скорость пиролиза с увеличением частоты вращения остается практически постоянной. Кривая абляции имеет линейный характер.

Из представленной на рис. 2, *в* зависимости скорости абляционного пиролиза от температуры диска видно, что температура оказывает значительное влияние на скорость пиролиза. Увеличение температуры, при прочих постоянных условиях, приводит к экспоненциальному увеличению скорости абляционного пиролиза, что соответствует закону химической кинетики. Однако следует отметить, что повышение температуры оказывает значительное влияние на состав образующихся продуктов. При повышении температуры доля неконденсирующихся газов значительно увеличивается с соответственным снижением доли жидких органических продуктов. Наибольший выход жидких продуктов отмечается в температурном диапазоне 460...530 °С [8].

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования позволили определить зависимость изменения скорости абляции при быстром механоактивированном пиролизе древесины сосны в зависимости от температуры процесса, скорости и силы механического воздействия на зону термического разложения. В связи с этим при определенных значениях температуры и давления существует оптимальное значение скорости механического воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грачев, А.Н. Биомассу – в жидкое топливо [Текст] / А.Н. Грачев, Р.Г. Сафин // Ресурсоэффективность в Республике Татарстан. – 2007. – № 1. – С.22–23.
2. Bridgwater, A.V. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass [Text] / A.V. Bridgwater // Chem. Eng. J. – 2003. – 91. – P. 87–102.
3. Czernik, S. Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil [Text] / S. Czernik, A. Bridgwater // Energy Fuels. – 2004. – Vol. 18. – P. 590–98.
4. Fast pyrolysis of wood: direct measurement and study of ablation rate [Text] / J. Lédé [et al.] // Fuel. – 1985. – 64. – P. 1514–1520.
5. Fusion-like behaviour of wood pyrolysis [Text] / J. Lédé [et al.] // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2003. – Vol. 70, issue 2. – P. 601–618.
6. Meier, D. New ablative pyrolyser in operation in Germany [Text] / D. Meier, S. Schoell // PyNe Newsletter, Issue 17, April 2004.
7. Peacocke, G. Ablative plate pyrolysis of biomass for liquids [Text] / G. Peacocke, A. Bridgwater // Biomass and Bioenergy. – 1994. – Vol. 7, issues 1-6. – P. 147–154.
8. Polagye, B.L. Thermochemical conversion of forest thinning [Text] / B.L. Polagye. – P. 61–62.

9. Power generation using fast pyrolysis liquids from biomass [Text] / D. Chiamonti [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – Vol. 11, issue 6. – P. 1056–1086.

Поступила 01.06.09

A.N. Grachev, R.G. Safin, R.G. Khismatov, A.A. Makarov
Kazan State Technical University

Experimental Research of Rate of Wood Mass Decrease in Quick Ablative Pyrolysis

The rate of wood mass decrease in the process of ablative wood pyrolysis is investigated. Dependencies of contact ablative pyrolysis of pine wood on temperature, force and rate of mechanical effect on the sample are determined.

Keywords: quick ablative pyrolysis, ablation, experimental research, mass decrease rate.
