



ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ БИОМАССЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВ

Василевич С.В., Дмитриев Г.М., Кожурин В.Н., Малько М.В.
Государственное предприятие «Институт энергетики НАН Беларуси»

Реферат – В работе обсуждаются предварительные результаты исследования пиролиза древесины, соломы и льнянокостры, проведенные в различных температурных условиях с целью получения газообразных и жидких продуктов. Дана упрощенная математическая модель расчета кинетики образования суммарных продуктов пиролиза, а также описание разработанной и изготовленной опытной установки по быстрому пиролизу биомассы в псевдоожиженном слое.

Ключевые слова: биомасса, пиролиз, газовые и жидкие продукты

RESEARCH OF THERMOCHEMICAL CONVERSION OF BIOMASS TO PRODUCE VARIOUS TYPES OF FUELS

Vasilevici S.V., Dmitriev G.M., Cojurin V.N., Maliko M.V.
State Enterprise "Institute of Power Engineering of NAS of Belarus"

Abstract – This paper discusses the preliminary results of the pyrolysis of wood, straw and linostry spent in various temperature conditions with the purpose to produce gaseous and liquid products. It is given simplified mathematical model for calculating the kinetics of the total pyrolysis products, as well as the developed and produced a pilot plant for biomass fast pyrolysis in a fluidized lay.

Keywords: biomass, pyrolysis, gas and liquid products

CERCETAREA CONVERSIEI TERMOCHIMICE A BIOMASEI PENTRU OBTINEREA DIFERITOR TIPURI DE COMBUSTIBIL

Vasilevici S.V., Dmitriev G.M., Cojurin V.N., Maliko M.V.
Întreprinderea de stat "Institutul de Energetică al ANŞ din Bielorusia"

Rezumat – În lucrare se discută rezultatele prealabile de cercetare a pirolizei lemnului, paielor și linocostrei, efectuate în condiții de diferite temperaturi cu scopul obținerii produselor gazoase și lichide. Se prezintă modelul matematic simplificat de calcul a cineticii de formare a produselor sumare de piroliză, precum și descrierea instalației experimentale elaborate și realizate de piroliză rapidă a biomasei în stratul de fluid.

Cuvinte cheie: biomasă, piroliză, gaz și produse lichide

ВВЕДЕНИЕ

Пиролиз представляет собой один из эффективных процессов термохимической переработки органических соединений, который происходит при повышенных температурах без участия кислорода. Теоретические и прикладные исследования пиролиза биомассы успешно развиваются на протяжении последних десятилетий в Великобритании [1], США [2], Индии [3] и других странах мира. Данное направление исследований и разработок представляет значительный интерес для Беларуси, что обусловлено рядом причин. Во-первых тем, что Беларусь не имеет значимых запасов ископаемого топлива и для обеспечения своих энергетических потребностей

вынуждена экспортировать около 80% энергоносителей, получаемых в основном из России. Беларусь обладает большими запасами древесины и это позволяет активно развивать пиролитические технологии для получения различных топлив и ряда важных продуктов для химического производства. Использование технологии пиролиза позволяет существенно снизить зависимость страны от внешних поставщиков ископаемых энергоносителей. Имеется и другая важная особенность этой технологии. Замена ископаемых энергоносителей на топлива, полученные с помощью пиролиза из биомассы позволяет снизить выбросы парниковых газов в окружающую среду, а также снизить количество других вредных веществ, образующихся при сжигании ископаемого

топлива. Указанные особенности использования биомассы и обусловили значительный интерес к развитию технологии пиролиза во многих странах мира.

Как известно, в качестве исходного сырья для пиролиза могут использоваться растительная биомасса, твёрдое ископаемое топливо, промышленные и бытовые отходы. Экономическая эффективность использования различных видов растительной биомассы определяется, в первую очередь, технологией её переработки. С одной стороны, растительная биомасса является широко распространённым возобновляемым энергетическим ресурсом и обладает достаточно высокой теплотой сгорания: для сухой стволовой древесины теплота сгорания составляет 18,8 МДж/кг, для соломы и льнокостры – 14,7 МДж/кг. С другой стороны, существует ряд недостатков, которые усложняют использование этого вида энергоресурсов. А именно: биомасса обладает малым насыпным весом; зола биомассы при достаточно низких температурах начинает плавиться, а минеральные остатки золы спекаются; биомасса имеет в своём составе большое количество калия и хлора; материалы оборудования для сжигания биомассы подвержены интенсивной коррозии. Всё это, безусловно, оказывает существенное влияние и на процесс пиролиза. В этом отношении пиролиз древесины обладает явным преимуществом, так как этот вид биомассы имеет невысокое содержание хлора и других химических элементов, вызывающих повышенную коррозию оборудования.

В результате пиролиза образуется горючий газ, высокоэнергетические жидкие продукты и кокс. Выход того или иного продукта, а также их энергетические и химические свойства зависят как от температуры процесса, так и скорости нагрева вещества и свойств сырья и среды, в которой процесс протекает [1-6].

При быстром нагреве и умеренных температурах (порядка 500 °С) доминирующим продуктом является жидкость с высокой теплотой сгорания, состоящая из сложных органических соединений и воды. При этом парогазовая смесь продуктов должна быстро (в течение нескольких секунд) выноситься из активной зоны реактора и охлаждаться.

При более высоких температурах и большем времени разложения, органические соединения пиролизной жидкости претерпевают дальнейшее разложение на более простые вещества и доминирующим продуктом является пиролизный газ, который в основном состоит из оксида и диоксида углерода, водорода и лёгких углеводородов.

Медленный и сверхмедленный (карбонизация) процессы пиролиза позволяют получить наибольшее количество твёрдого остатка (кокса). В таблице 1 проведено обобщение известных данных по влиянию скорости и температуры процесса пиролиза на выход продуктов [7].

Классифицировать технологии быстрого пиролиза по конструкционным особенностям реактора можно следующим образом [6]:

- Пиролиз в кипящем слое;
- Абляционный пиролиз;
- Пиролиз в циркулирующем кипящем слое (ЦКС);
- Пиролиз в двух реакторах кипящего слоя (КС);
- Пиролиз в реакторе с двумя шнеками;
- Пиролиз в потоке.

Таблица 1- Классификация основных технологий пиролиза по температуре и скорости процесса [7]

	Быстрый низкотемпературный	Быстрый высокотемпературный	Медленный	Карбонизация
Время процесса	1с	1с	5-30 мин	часы, дни
Размер сырья	малый	малый	средний	большой
Влажность сырья	Очень низкая	Очень низкая	низкая	низкая
Температура, °С	450-600	650-1000	500-700	400-600
Давление, кПа	100	10-100	100	100
Выход газа, % от м.с.с.	до 30	до 70	до 40	до 40
Теплота сгорания газа, МДж/нм ³	10-20	10-20	5-10	2-4
Выход жидких продуктов, % от м.с.с.	до 80	до 20	до 30	до 20
Теплота сгорания жидких продуктов, МДж/кг	23	23	23	10-20
Выход кокса, % от м.с.с.	До 15	до 20	20-30	30-35
Теплота сгорания кокса, МДж/кг	30	30	30	30

* Количество жидкости с учетом воды образованной при разложении и исходной влажности сырья

В настоящей работе приведены предварительные результаты экспериментального исследования пиролиза биомассы, выполненные в Институте энергетики Национальной академии наук Беларуси.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПИРОЛИЗА

Описание термического разложения биомассы в работе проводилось на основе упрощенной кинетической схемы [3]:

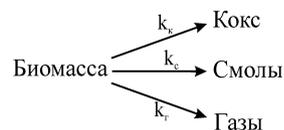


Рис. 1 – Одноступенчатая схема кинетики пиролиза биомассы

В соответствии с этой схемой рассматривается разложение биомассы в области повышенных температур с образованием конечных продуктов таких как кокс, газы и смола. Формальные константы скоростей этих процессов можно представить в виде аррениусовского уравнения:

$$k = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (1)$$

где A – предэкспоненциальный множитель, E_a – энергия активации, T – температура биомассы, R – универсальная газовая постоянная.

В расчетах, выполненных в настоящей работе, значения констант скоростей реакций образования кокса, газов и смолы, рассчитывались на основании эмпирических выражений, представленных в работе [8].

В качестве исходных предположений математической модели были приняты следующие предположения: Описание задачи теплообмена в реакционной зоне в настоящей работе аналогично описанию, использованному автором [8]:

- Частицы имеют правильную сферическую форму;
- В силу симметричности задачи используется только одна координата r ;
- Тепло передается только в радиальном направлении от поверхности к центру частицы;
- Теплообмен внутри частицы происходит только за счёт теплопроводности;
- В каждой точке частицы в общем случае могут присутствовать компоненты четырёх фаз: первоначальной древесины, кокса, жидкой и газообразной фаз;
- Для описания концентраций каждой из фаз в данной точке частицы, используются среднееобъемные плотности этих фаз ($\rho_B, \rho_K, \rho_{Ж}, \rho_G$), которые являются функциями координаты r и времени t ;
- Доли объёма, занимаемые каждым из компонентов сложной частицы в данной точке определяются выражениями:

$$\varepsilon_B = \frac{\rho_B}{\rho_{B0}}; \quad \varepsilon_K = \frac{\rho_K}{\rho_{K0}}; \quad \varepsilon_{Ж} = \frac{\rho_{Ж}}{\rho_{Ж0}}; \quad \varepsilon_G = \frac{\rho_G}{\rho_{G0}}, \quad (2)$$

где индексом 0 отмечена истинная плотность компонента.

- Частица в процессе пирофикации не изменяет свой размер;
- Эффективная теплоёмкость единицы объёма вещества частицы в данной точке определяется как суперпозиция удельных теплоёмкостей компонентов:

$$C_{eff} = \rho_B \cdot c_B + \rho_K \cdot c_K + \rho_{Ж} \cdot c_{Ж} + \rho_G \cdot c_G; \quad (3)$$

- Эффективная теплопроводность вещества частицы в данной точке определяется как суперпозиция теплопроводностей компонентов:

$$k_{eff} = \varepsilon_B \cdot k_B + \varepsilon_K \cdot k_K + \varepsilon_{Ж} \cdot k_{Ж} + \varepsilon_G \cdot k_G \quad (4)$$

- Скорости изменения концентраций отдельных фаз определяются исходя из следующих выражений:

$$\frac{\partial \rho_K}{\partial t} = \rho_B \cdot A_K \cdot \exp\left(-\frac{E_K}{RT}\right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho_{Ж}}{\partial t} = \rho_B \cdot A_{Ж} \cdot \exp\left(-\frac{E_{Ж}}{RT}\right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho_G}{\partial t} = \rho_B \cdot A_G \cdot \exp\left(-\frac{E_G}{RT}\right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho_B}{\partial t} = -\rho_B \cdot (A_K \cdot \exp\left(-\frac{E_K}{RT}\right) + A_{Ж} \cdot \exp\left(-\frac{E_{Ж}}{RT}\right) + A_G \cdot \exp\left(-\frac{E_G}{RT}\right)) \quad (8)$$

Поскольку в начальный момент времени частица целиком состоит из биомассы, а температура во всём объёме равная первоначальной температуре, начальные условия записываются в виде:

$$\rho_B(r,0) = \rho_{B0}; \quad \rho_K(r,0) = 0; \quad \rho_{Ж}(r,0) = 0; \quad \rho_G(r,0) = 0; \quad \rho_{Ж}(r,0) = 0; \quad T(r,0) = T_0 \quad (9)$$

Координата r имеет две границы – 0 и R , которые соответствуют центру и поверхности частицы. Для этих точек необходимо ввести определённые ограничения, которые являются граничными условиями. В связи с радиальной симметричностью задачи возникает следующее ограничение:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=0} = 0 \quad (10)$$

На поверхности частицы возникают ограничения, связанные со скоростью подвода тепла из окружающей среды. Теплообмен частицы со средой обусловлен как процессом конвективной теплоотдачи, так и радиационным теплообменом. Исходя из закона сохранения энергии тепло, переносимое внутрь частицы должно быть равным теплу, передаваемому частице из среды, поэтому:

$$k_{eff} \left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=R} = h(T_{cp} - T) + \varepsilon \sigma (T_{cp}^4 - T^4) \quad (11)$$

где h – коэффициент конвективной теплоотдачи; σ – постоянная Стефана-Больцмана; ε – степень черноты частицы; T_{cp} – температура окружающей частицу среды.

Температура внутри обрабатываемой частицы определяется из уравнения энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t} [C_{eff} \cdot T] = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r} \right) - Q_{нур} \cdot \frac{\partial \rho_B}{\partial t} \quad (12)$$

Коэффициент конвективной теплоотдачи можно рассчитать исходя из корреляции Кауфмана:

$$h = 0.322(k/l) \text{Pr}^{1/3} \text{Re}^{0.5} \quad (13)$$

На основе описанной математической модели в среде программирования Delphi была разработана компьютерная программа, которая позволяет отслеживать кинетику процесса пиролиза частиц биомассы при разных условиях. Схема рабочего окна Этой программы представлена на рис.2.

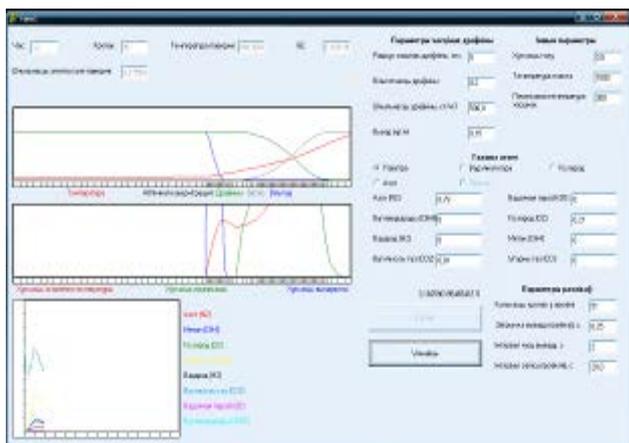


Рис. 2 – Рабочее окно разработанной компьютерной программы для моделирования процесса пиролиза частиц биомассы

Расчетные исследования, выполненные в работе с помощью данной программы, показали, что приведенная выше математическая модель позволяет рассчитать количества суммарных продуктов пиролиза (кокс, газы, жидкость) с погрешностью не ниже 10%.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПИРОЛИЗА БИОМАССЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ

Исследовался пиролиз проб биомассы в неподвижном слое и в псевдосжиженном слое. Исследования в неподвижном слое проводили в реторте из кварцевого стекла с внешним электрообогревом в неподвижном слое со скоростью нагревания 5–8°С/мин при температурах от 459 до 800°С.

Пиролиз проб биомассы в псевдоожиженном слое изучался на лабораторной установке, состоящей из пиролизера со шнековой подачей сырья и внешним электрообогревом. Блок-схема установки представлена рисунке 3.

Основными элементами установки являются: 1 – регулятор скорости вращения шнека; 2 – мотор-редуктор; 3 – гибкий вал привода; 4 – блок уплотнителей и передняя опора вала; 5 – приемный бункер с герметичной крышкой; 6 – основная часть корпуса шнека; 7 – электронагреватель (N = 1.5 кВт); 8 – дополнительная съемная часть корпуса шнека; 9 – шнек; 10 – фильтр-охладитель пиролизного газа; 11 – газометр; 12 – приемник твердого остатка; 13 – контроль температуры; 14 – источник питания нагревателя.

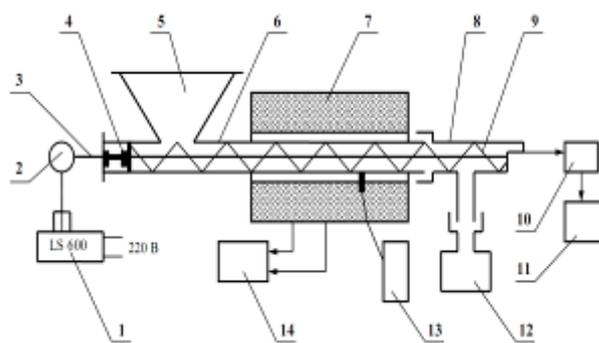


Рис. 3 – Схема лабораторной установки по пиролизу твердых топлив в подвижном слое.

Летучие продукты, образующиеся в виде парогазовой смеси в реакционной зоне этой установки, отводятся в систему охлаждения и очистки 10, затем в газометр 11, а твердый остаток (кокс) собирается в приемной колбе 12.

В качестве сырья для пиролиза использовались коистра льна, солома ржи, а так же сосновые опилки. В таблице 2 представлены данные по основным компонентам, входящим в состав органической массы изученных проб.

Таблица 2 – Состав органической массы

Элементы органической массы	Солома	Льнокостра	Древесина
C	49	48,2	49,5
H ₂	6,3	6	6,5
O ₂	43,5	43,5	43,9
N ₂ +S	1,2	1,7	0,5

Как следует из таблицы, изученные виды биомассы имеют практически одинаковый элементный состав по углероду, водороду и кислороду.

Изучение закономерностей термохимических превращений ржаной соломы, льнокостры и древесины, которые наблюдаются при пиролизе и горении, проводилось также методом термического анализа (ТА) в различных режимах на дериватографе марки ОД-103 и экспериментальных установках в стационарном и подвижном слое при разных скоростях нагрева.

В результате проведенных исследований было выявлено, что при пиролизе растительного сырья наиболее интенсивно процесс термического разложения органического вещества протекает с экзотермическим эффектом в области температур 200–400°С. При этом потери массы составили около 50%, также фиксируются два максимума скорости термораспада при 300 и 340°С, ответственные за разложение гемицеллюлоз и целлюлозы. При достижении температуры 370°С процесс термораспада замедляется и протекает с меньшей скоростью до 840°С.

Потеря массы при термическом разложении происходит также интенсивно и в интервале температур 500–900°С и составляет 21–23% за счет

термохимических превращений, протекающих в твердом остатке, что свидетельствует о его низкой термоустойчивости, обусловленной химическим составом, главным образом наличием кислородосодержащих соединений (табл. 3). Твердый остаток практически весь превращается в летучие соединения, потери массы достигают при этом для соломы ржи 95%.

Таблица 3 – Результаты термогравиметрического анализа горючих отходов растениеводства

Вид биомассы	Влажность, %	Зольность, %	Потери массы, °С, % в интервале температур на сухое вещество			
			До 200	200-500	500-900	200-900
Костра льна	4,3	2,9	9,0	65,1	23,4	88,5
Солома ржи	4,1	4,5	8,5	73,3	21,6	94,9
Древесина	9,5	1,3	12,0	63,5	13,1	76,6

Общие закономерности процесса пиролиза биомассы, по данным термического анализа, аналогичны, однако, термоустойчивость органического вещества особенно в области температур 200–500°С льнокостры выше. Потери массы составляют 65,1%, для ржаной соломы – 73,3%. Однако потери масс при пиролизе древесной биомассы в области температур 200–900°С значительно выше и составляют 76,6%. При пиролизе проб биомассы в интервале температур 450-600 °С наблюдается максимальный выход жидких продуктов.

Были определены выход продуктов термического разложения, состав и теплота сгорания газа суммарного и по фракциям с интервалом температур – 100°С. Выход продуктов при медленном нагреве отходов растениеводства составил: кокса – 15%, жидких продуктов (вода + смола) – около 55%, газа – 30% (таблица 4).

Таблица 4 – Состав и теплота сгорания газа

Наименование	Состав газа, % объемные					Нижшая теплота сгорания, ккал/м ³
	CO ₂	C _n H _m	CO	H ₂	CH ₄	
T = 800°С, скорость нагрева 5–8°С/мин, неподвижный слой						
Ржаная солома	24,6	1,5	23,7	31,5	18,8	3335
Льнокострада	21,5	1,7	22,2	32,9	21,7	3610
T = 800°С, скорость нагрева 100°С/мин, подвижный слой						
Ржаная солома	5,0	0	43,6	48,0	3,6	2865
Льнокострада	3,6	0,8	42,5	49,1	4	3235
Древесина	4,1	0,9	44,1	47,5	3,4	3217
Торф	6,5	1,0	38,7	47,2	6,6	3024

Как следует из таблицы 4, основными горючими компонентами газа пиролиза является водород,

монооксид углерода, метан и непредельные углеводороды.

Вид исходного сырья не оказал существенного влияния на состав газа, хотя и отмечено повышенное содержание метана в пиролизном газе льнокостры, что обусловлено ее химическим составом, т.е. более высоким содержанием в органическом веществе метоксильных групп. В связи с этим теплота сгорания газа ржаной соломы оказалось на 8% ниже теплоты сгорания газа, полученного из льнокостры.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПИРОЛИЗА БИОМАССЫ В ОБЛАСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ЖИДКИХ ПРОДУКТОВ

Полученные ранее расчетные и экспериментальные данные по исследованию влияния химического состава биомассы на выход и состав конечных продуктов были использованы при работе на установке по пиролизу в подвижном слое со шнековой подачей исходного сырья. Разработанный технологический процесс получения высококалорийных энергоносителей методом пиролиза биомассы включает следующие стадии: подготовку сырья, пиролиз, конденсацию парогазовой смеси, сбор и удаление жидких продуктов пиролиза, сгорание газообразных продуктов пиролиза, стабилизацию давления в системе посредством отбора части пиролизного газа.

На рисунке 4 представлена блок-схема данной установки.

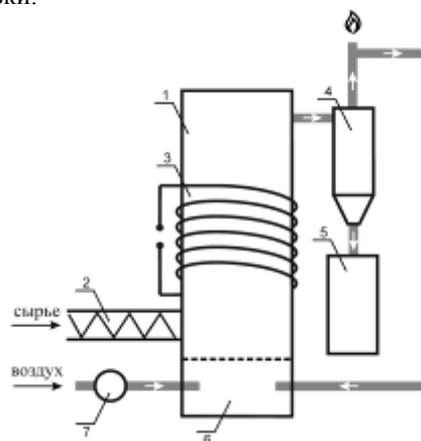


Рис. 4 - Блок-схема экспериментальной установки по термохимической переработке методом пиролиза.

Так как находящаяся в сырье вода является балластом, биомассу высушивают на воздухе до содержания массовой доли влаги не более 15 %. Измельчение сырья до размеров частиц < 3 мм происходила в процессе его шнековой подачи питателем из бункера в дозатор и затем непосредственно в пиролизер.

В опытах, выполненных к настоящему времени в Институте энергетики НАН Беларуси, проведено изучение сухих опилок, а также древесного угля. Перед испытанием проба биомассы анализировалась по следующим показателям: влажность, зольность,

элементный и гранулометрический состав, низшая теплота сгорания (табл. 5).

Таблица 5 – Характеристика исходной биомассы

Влажность, %	Зольность, %	Размер частиц, мм	Элементный состав, % на орг. массу	Теплота сгорания $Q_{пн}^p$, ккал/кг
15,0	4	< 3	C – 49,5 H – 6,5 O – 43,9 N – 0,12	3580

Количественный выход продуктов пиролиза тесно связан также с гранулометрическим составом перерабатываемого сырья: чем он однороднее и чем меньше размер частиц, тем больше летучих продуктов поступает в парогазовую смесь и тем в меньшей степени они подвержены вторичным термохимическим процессам. Экспериментально установлен оптимальный размер частиц исходного сырья для пиролиза около 3 мм, достаточно мелкий, чтобы сырье можно было считать гомогенной средой. Подготовленная таким образом биомасса и частично измельченная шнековым питателем (2) подается в рабочую зону предварительно нагретого до заданной температуры реактора (1). Производительность шнекового питателя регулируется скоростью вращения шнека посредством изменения частоты вращения магнитного поля короткозамкнутого трехфазного двигателя.

Циркулирующий слой исходного сырья образуется под воздействием поступающего в нижнюю часть реактора псевдоожижающего агента, в роли которого при выходе на технологический режим выступают продукты сгорания прошедшего конденсационно-очистительную систему пиролизного газа. Скорость циркуляции исходного сырья регулируется с помощью изменения расхода воздуха, подаваемого с помощью компрессора (6), а также изменения расхода отбираемого пиролизного газа. Передача тепла частицам биомассы осуществляется системой электрического обогрева (3). После достижения заданной температуры в рабочей зоне пиролизера, ее поддерживают некоторое время (10-20 мин) для выравнивания температуры по всему рабочему объему реактора. Температурные режимы пиролиза контролируются термопарами.

Парогазовая смесь в процессе термического разложения биомассы, поступает в систему конденсации, которая представлена циклоном-конденсатором (4).

Жидкие продукты пиролиза (смола и вода) стекают в емкость сбора жидких продуктов (5).

Газообразные продукты пиролиза частично подаются в камеру сгорания (6), частично выводятся из системы для регулировки давления.

Коксозольный остаток остается в рабочей зоне пиролизного реактора (1), откуда может быть извлечен после окончания работы реактора подачей высокоскоростного потока углекислого газа.

Установка является герметичной, воздух поступает только в камеру сгорания, где полностью реагирует с

пиролизным газом, таким образом, пиролиз протекает без доступа воздуха. Для контроля процесса установка снабжается пультом непрерывной фиксации температуры и давления в различных ее точках.

Электромеханические приводы шнека-питателя пиролизера состоят из червячных мотор-редукторов с регулятором скорости вращения, что позволит выбирать оптимальные режимы работы установки.

Экспериментальный образец ПУ предназначен для проведения скоростного пиролиза в псевдоожиженном слое с получением высококалорийных газообразных энергоносителей и жидких продуктов. На рисунке 5 приведены массовые выходы жидких продуктов пиролиза (смола+влага) древесного угля и древесных опилок от температуры в кипящем слое реактора и влажности сырья. Фракционный состав биомассы – 1,0-3,0 мм. Влажность биомассы – 10% (светлые символы) и 25% (темные символы).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ЖИДКИХ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА.

В настоящее время в Институте энергетики НАН Беларуси, на установке, описание которой представлено в предыдущем разделе, проведено изучение процесса пиролиза сухих опилок и древесного угля в интервале температур от 350 до 600 °С. Предварительные результаты этих исследований представлены на рисунке 5, на котором показаны графики зависимости суммарного количества жидкости, образовавшееся при разложении исходных образцов биомассы (т.е. количество смолы, испарившейся воды и воды, образовавшейся в результате пиролиза биомассы) от температуры в реакторе и влажности сырья.

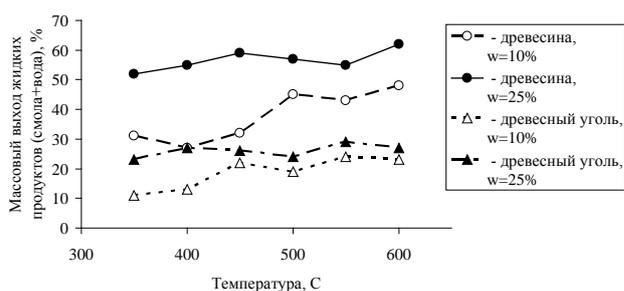


Рис. 5 – График зависимости массового выхода жидких продуктов пиролиза от температуры

Как видно из рисунка, суммарный выход жидких продуктов и воды в области исследованных температур слабо зависит от температуры. Установлено также, что выход таких важных продуктов пиролиза, как фенол, толуол, бензол, алкен, алка-диен сильно зависит от влажности сырья. Например, в случае фенола, было выявлено, что повышение влажности древесной биомассы от 10 до 25% приводит к снижению концентрации фенолов в растворе жидких продуктов от 4,5 до 0,4 мг/мл.

ВЫВОДЫ

В ходе выполнения работ по исследованию пиролиза биомассы разработана математическая модель, адекватно описывающая процесс пиролиза биомассы, и выполнены экспериментальные исследования пиролиза различных проб биомассы в условиях преимущественного образования газовых продуктов, а также в условиях преимущественного образования жидких продуктов. В опытах, проведенных на установке, разработанной для изучения быстрого пиролиза в псевдооживленном слое определена динамика выхода смолы, газа и кокса в зависимости от температуры.

Установлено, что для получения максимального выхода жидких продуктов пиролиза надлежащего качества из биомассы температура процесса не должна превышать 600°C.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bridgwater A.V. *Biomass Fast Pyrolysis. Thermal Science.*:Vol. 8 (2004), No. 2, pp. 21-49.
- [2] Mohan D., Pittman Ch. U., Jr. Steele P. H. *Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review.* Energy & Fuels. No 20 (2006),pp. 848-889/
- [3] Prakash N., Karunanithi T. *Kinetic Modeling in Biomass Pyrolysis-A Review.* J.Appl.Sci.Res., Vol.4, No.12 (2008), pp. 1627-1636.
- [4] Соколовская Ю.Г. Фалюшин П.Л. *Пиролиз отходов мебельного производства / Природопользование.* Выпуск 20, 2011, Минск. С. 143-146
- [5] Василевич С.В. *Исследование влияния влажности биомассы на состав продуктов газификации / Весці НАН Беларусі. Сер. Фіз.-тэхн. навук – 2006. - №5. – С.17-19*
- [6] Гелетуха Г.Г., Железная Т.А. *Обзор современных технологий получения жидкого топлива из биомассы быстрым пиролизом. Часть I // Экотехнологии и ресурсосбережение.* № 2, 2000, Киев. С. 3-10
- [7] Ульзугуева Л.П., Голыпмидт Ю.М., Хулова Е.В. и др. *Древесносмоляной лак на основе отстойной смолы // Гидролиз, и лесохим. промьсть.* 1986. № 3. • С. 12-14
- [8] J. Porteiro, J.L. Miguez, E. Granada and J.C. Moran, *Mathematical modelling of the combustion of a single wood particle.* Fuel Proc Technol, 87 (2006), pp 169-175.

АВТОРЫ



Василевич Сергей Владимирович, 1982 года рождения. В 2004 г. окончил Белорусского государственного технологического университета по специальности лесоинженерное дело. В 2004 г. поступил в аспирантуру Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси по специальности промышленная

теплоэнергетика. До 2012 г. работал в должности научного сотрудника лаборатории дисперсных систем Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси.

Кандидат технических наук (2011 г. - защита диссертации).

В настоящий момент работает заведующим лабораторией возобновляемых источников энергии ГП «Институт энергетики НАН Беларуси».



Дмитриев Геннадий Михайлович, 1948 года рождения. Окончил Белорусский государственный университет, отделение радиофизики. После окончания Университета поступил на Минский механический завод им. С.И. Вавилова и проработал в должностях инженера-технолога, начальника электролаборатории, заместителя и секретаря парткома, заместителя главного инженера БелОМО.

Кандидат технических наук (2004 г. - защита диссертации).

Член-корреспондент Белорусской инженерной академии. С 1998 по 2008 год Дмитриев Г.М. работал начальником Минского городского управления по надзору за рациональным использованием ТЭР.

В 2009 году перешел в Институт энергетики НАН Беларуси В настоящее время работает в должности директора Института.



Кожурин Василий Николаевич, 1982 года рождения. В 2005 г. окончил Белорусского государственного технологического университета, факультет «Технология органических веществ». В 2008 г. окончил аспирантуру ГНУ «Институт природопользования НАН Беларуси» по специальности химия и технология топлив и специальных продуктов. До 2012 г. работал в должности научного сотрудника лаборатории возобновляемых источников энергии Института энергетики НАН Беларуси.



Малько Михаил Владимирович (родился 15.08.1942) – ведущий научный сотрудник Института энергетики Национальной академии наук Беларуси. В 1960-1966 гг. учился на физическом факультете Белорусского государственного университета (г. Минск). После окончания учебы в университете работает в Национальной академии наук Беларуси. В 1973 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (Институт тепло- и массообмена НАН Беларуси).