

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-253-263>

УДК 549.742.121+662.765

Расчетное исследование выхода твердых продуктов пиролиза древесины при повышенном давлении

С. В. Василевич¹⁾, М. В. Малько²⁾, Д. В. Дегтеров²⁾, А. Н. Асадчий²⁾

¹⁾Белорусская государственная академия авиации (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Институт энергетики НАН Беларуси (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. В статье представлена кинетическая модель пиролиза древесины под давлением с учетом диффузии образующихся газофазных продуктов (тяжелых углеводородов) и реакций их разложения. В основу модели положен упрощенный механизм пиролиза древесины, включающий две последовательные химические реакции: первичную реакцию разложения древесной биомассы с образованием твердых и газообразных компонентов и реакцию термического разложения в порах биомассы углеводородов, образовавшихся в первичном процессе. Модель учитывает диффузию первичных продуктов пиролиза из образовавшихся пор и термическое разложение их в порах. На основании разработанной модели создана компьютерная программа расчета основных параметров процесса пиролиза под давлением, проведены вычисления массового выхода твердых продуктов пиролиза в различных условиях. При расчете учитывались основные параметры, влияющие на выход твердых продуктов древесной биомассы: температура и давление пиролиза, размеры частиц, пористость и др. Установлено, что повышение давления, при котором осуществляется пиролиз древесной биомассы, приводит к увеличению образования количества твердых продуктов, что соответствовало экспериментальным данным. При давлении 1 атм и размере частицы 0,025 м максимальный выход твердых продуктов наблюдается при температуре 600 °С. С ростом давления значение максимального выхода возрастает, при этом температура, при которой достигается максимум, снижается. При давлении 10 атм и размере частицы 0,025 м максимальный выход твердых продуктов наблюдается при температуре около 500 °С – в 1,18 раза больше, чем при 1 атм. Отмечено, что температура максимального выхода древесного угля снижается с увеличением размеров пиролизуемых частиц. Так, при размере частицы 0,5 м эта температура составляет порядка 400 °С при 10 атм.

Ключевые слова: древесина, термическое разложение, избыточное давление, вторичные реакции, константы скорости реакций, массовый выход

Для цитирования: Расчетное исследование выхода твердых продуктов пиролиза древесины при повышенном давлении / С. В. Василевич [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 3. С. 253–263. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-253-263>

Адрес для переписки

Василевич Сергей Владимирович
Белорусская государственная академия авиации
ул. Уборевича, 77,
220096, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 341-94-22
svasilevich@yandex.ru

Address for correspondence

Vasilevich Sergey V.
Belarusian State Academy of Aviation
77, Uborevicha str.,
220096, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 341-94-22
svasilevich@yandex.ru

Computational Study of the Yield of Solid Wood Pyrolysis Products under High Pressure

S. V. Vasilevich¹⁾, M. V. Malko²⁾, D. V. Degterov²⁾, A. N. Asadchyi²⁾

¹⁾Belarusian State Academy of Aviation (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The kinetic model of wood pyrolysis under pressure is discussed in the present paper taking into account the diffusion of the resulting gas-phase products (i.e. heavy hydrocarbons) and their decomposition reactions. This model is based on a simplified mechanism of wood pyrolysis, including two parallel chemical reactions, viz. the primary decomposition reaction of wood biomass with the formation of solid and gaseous components and the thermal decomposition reaction in the biomass pores of hydrocarbons formed in the primary process. The model takes into account the diffusion processes of the primary pyrolysis products from the resulting pores and thermal decomposition in the pores of these products. Based on the developed model, a computer program for calculating the main parameters of the pyrolysis process under pressure was created and the mass yield of solid pyrolysis products under various conditions was calculated. The calculation took into account the main parameters that affect the yield of solid wood biomass products, viz. temperature and pyrolysis pressure, particle sizes, porosity, etc. The calculations demonstrated that the increase of the pressure at which the pyrolysis of wood biomass is carried out causes an increase of the formation of the amount of solid products, which corresponds to the available experimental data. It was established that at a pressure of 1 atm when a sample size is of 0.025 m, the maximum yield of solid products is observed at the temperature of 600 °C. As the pressure increases the maximum yield increases, while the temperature at which the maximum is reached decreases. So, at a pressure of 10 atm when a particle size is of 0.025 m, the maximum yield of solid products is observed at the temperature of about 500 °C, and it is higher than that at 1 atm by 1.18 times. It was also determined that the temperature of the maximum yield of charcoal decreases with increasing sizes of pyrolyzable samples. Thus, when a sample size is of 0.5 m, this temperature is about 400 °C at 10 atm.

Keywords: wood, thermal decomposition, overpressure, secondary reactions, reaction rate constants, mass yield

For citation: Vasilevich S. V., Malko M. V., Degterov D. V., Asadchyi A. N. (2020) Computational Study of the Yield of Solid Wood Pyrolysis Products under High Pressure. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (3), 253–263 <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-253-263> (in Russian)

Введение

Пиролиз представляет собой процесс термического разложения органических соединений без доступа кислорода. В результате пиролиза древесной биомассы в зависимости от имеющихся условий образуются твердые (древесный уголь), жидкие (низко- или высокомолекулярные смолы) и газообразные (синтез-газ) продукты. Количество и состав получаемых продуктов зависят от многих параметров: температуры, давления, влажности, природы сырья, размера пиролизуемых частиц и др.

В [1] показано, что осуществление пиролиза древесного сырья при давлении 0,7 МПа позволяет получить древесный уголь с содержанием углерода более 96 %. Такой древесный уголь может использоваться для создания активированного угля, производство которого в Беларуси в настоящее время отсутствует и потребность в котором покрывается за счет импорта. Решение этой задачи требует проведения фундаментальных и прикладных исследований пиролиза биомассы в условиях образования древесного угля, а также расчетно-теоретических исследований процесса пиролиза древесной биомассы при повышенном давлении.

Влияние давления на процесс пиролиза древесины обнаружено экспериментально более ста лет назад П. Класоном и др. [2, 3]. Изучая пиролиз целлюлозы и древесной биомассы при температуре 400 °С, исследователи установили, что выход древесного угля увеличивается с ростом давления. По их мнению, этот эффект обусловлен разложением газообразных продуктов пиролиза в порах пиролизуемого материала. Повышение давления приводит к снижению скорости диффузии газообразных продуктов из пор, что вызывает их задержку внутри пор и последующее разложение с увеличением количества образующегося древесного угля и выхода летучих компонентов CO₂, CO, H₂ и др.

Выводы авторов [2, 3] о положительном влиянии давления на выход твердых продуктов были подтверждены при исследовании пиролиза различных типов биомассы в [4–8].

Цель исследования авторов данной статьи – разработка упрощенной математической модели пиролиза древесной биомассы, которая бы позволила учесть влияние давления на процесс пиролиза древесины в условиях, при которых основным конечным продуктом является древесный уголь.

В основу предлагаемой модели положен упрощенный механизм пиролиза древесины, включающий две последовательные химические реакции: первичную реакцию разложения древесной биомассы с образованием твердых и газообразных компонентов и реакцию термического разложения в порах биомассы углеводородов, образовавшихся в первичном процессе. Такой формальный подход является общепринятым при анализе кинетики термического разложения биомассы, что обусловлено отсутствием полного понимания исключительно сложного механизма термического разложения древесной биомассы.

Кинетика термического разложения биомассы

Кинетика термического разложения древесной биомассы рассматривается на основе упрощенного механизма, учитывающего первичный процесс разложения биомассы с образованием твердых и газообразных продуктов и разложение газообразных продуктов внутри образовавшихся пор.

С формальной точки зрения первая реакция может быть представлена в следующем виде:



Кинетическое уравнение реакции (1) при этом имеет вид [9]

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T)f(\alpha), \quad (2)$$

где α – степень термического разложения исходной древесной биомассы; $k(T)$ – аррениусовская константа скорости; $f(\alpha)$ – дифференциальная функция кинетического уравнения.

Степень разложения в момент времени t определяется из соотношения

$$\alpha_t = \frac{m_0 - m_t}{m_0 - m_\infty}, \quad (3)$$

где m_0 – исходная масса пиролизуемой частицы; m_t – масса частицы в момент времени t ; m_∞ – то же в конце разложения.

Интегрирование (2) при постоянной температуре дает уравнение скорости реакции

$$g(\alpha) = kt, \quad (4)$$

где $g(\alpha)$ – интегральная функция кинетического уравнения.

В [10] установлено, что разложение древесной биомассы в области температур 400–600 °С протекает в соответствии с сигмоидальным уравнением Аврами – Ерофеева

$$kt = [-\ln(1-a)]^n, \quad (5)$$

где n – показатель, равный ~0,5 (далее – n_1).

По данным [10], константа скорости термического разложения древесной биомассы в области температур 400–600 °С определяется выражением

$$k = 38,5 \exp\left(-\frac{57200}{RT}\right). \quad (6)$$

Уравнение (5) можно разрешить относительно степени термического разложения α

$$\alpha = 1 - \exp\left[-(kt)^{\frac{1}{n}}\right]. \quad (7)$$

Использование уравнения Аррениуса (6) позволяет рассчитать степень разложения древесной биомассы в любой момент времени, по крайней мере в интервале температур от 400 до 600 °С. Этот вывод подтверждается данными рис. 1, на котором приведено сравнение экспериментальных значений степени разложения древесных частиц размерами 8×10×25 мм с величинами, рассчитанными по (7).

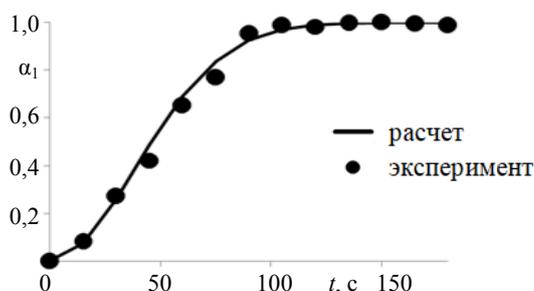


Рис. 1. Зависимость степени термического разложения древесины при температуре 600 °С и размере частиц 8×10×25 мм от времени разложения

Fig. 1. Dependence of the degree of thermal decomposition of wood samples at a temperature of 600 °С and a particle size of 8×10×25 mm on the decomposition time

В качестве константы скорости термического разложения пиролизной смолы использовали уравнение Аррениуса [11]

$$k = 14,2 \exp\left(-\frac{63100}{RT}\right). \quad (8)$$

Выражение (8) было определено на основании экспериментальных результатов, полученных в процессе исследования термического разложе-

ния пиролизной смолы в изотермических условиях при температурах 500, 600, 700 и 850 °С [11]. Анализ показал, что использование (8) позволяет с приемлемой точностью рассчитать значения степени термического разложения пиролизной смолы, определенные в [11], по выражению (7), в котором параметр n принят равным 1,007 (далее n_2).

Возможность применения (8) для расчета степени термического разложения пиролизной смолы подтверждается данными, представленными на рис. 2.

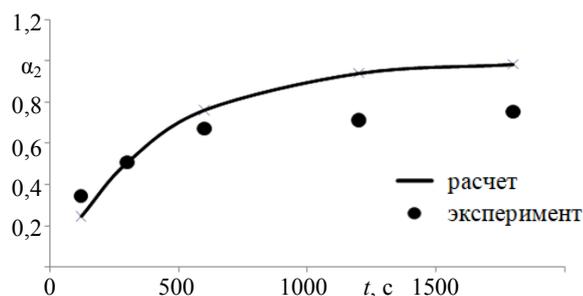


Рис. 2. Зависимость степени термического разложения газообразных продуктов пиролиза при температуре 600 °С от времени разложения

Fig. 2. Dependence of the degree of thermal decomposition of the gaseous products of pyrolysis at a temperature of 600 °С on the time of decomposition

Математическая модель пиролиза древесной биомассы

Для кинетического описания влияния избыточного давления на массовый выход твердых продуктов пиролиза предложена модель, в основу которой положено рассмотрение в зоне разложения цилиндрической древесной частицы диаметром d_0 и длиной L . Термическое разложение частицы происходит при ее равномерном прогреве. Предполагается, что градиент температур внутри частицы равен нулю ($dT/dL = 0$; $dT/dr = 0$). Это свидетельствует о равенстве внутренней и внешней температур частицы.

Общая масса частицы в зоне разложения

$$m = m_0 - m_1 + m_2, \quad (9)$$

где m_1 – потеря массы частицы в результате первичной реакции пиролиза, кг; m_2 – масса твердого углерода, получаемого в результате вторичной реакции разложения, кг.

Средняя скорость (модуль скорости) прохождения газообразных продуктов через частицу

$$v = \frac{L}{4t_2} = \frac{dm_1}{dt} \frac{1}{2\rho S}, \quad (10)$$

где L – длина частицы древесины, м; t_2 – время пребывания газообразных продуктов внутри частицы, с; dm_1/dt – скорость изменения потока газообразных продуктов, полученных в результате первичных реакций, через частицу древесины, кг/с; ρ – плотность газообразных продуктов, кг/м³; S – общая площадь пор, через которые проходят газообразные продукты, м².

Суммарная площадь пор определяется из выражения

$$S = \frac{\pi d^2}{4} \left(\frac{\Pi}{100 - \Pi} \right), \quad (11)$$

где d – диаметр древесной частицы, м; Π – пористость древесины, %.

Плотность газообразных продуктов зависит от давления и температуры и с использованием уравнения Менделеева – Клапейрона определяется как

$$\rho = \frac{1}{0,0224} \sum_{i=1}^N M_i X_i \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T}, \quad (12)$$

где N – общее число компонентов в газообразных продуктах; M_i – молярная масса i -го компонента, кг/моль; X_i – доля i -го компонента в газообразных продуктах; P – давление, Па; P_0 – давление при нормальных условиях (101325 Па); T – температура, К; T_0 – температура при нормальных условиях (273,15 К).

В (10) dm_1/dt определяется как дифференциал m_1 (из (3)) по времени

$$\frac{dm_1}{dt} = (m_0 - m_\infty) \frac{1}{n_1} k_1^{1/n_1} t^{1/n_1 - 1} \exp\left(-k_1 t^{1/n_1}\right). \quad (13)$$

Подставив (13) в (10), получим выражение для определения времени пребывания газообразных продуктов внутри частицы древесины

$$t_2 = \frac{L\rho S}{2(m_0 - m_\infty) \frac{1}{n_1} k_1^{1/n_1} t^{1/n_1 - 1} \exp\left(-k_1 t^{1/n_1}\right)}, \quad (14)$$

где k_1 – константа скорости термического разложения древесной биомассы, с^{-1} , определяется по (6); t_2 – время, соответствующее времени протекания вторичных реакций разложения газообразных продуктов с выделением углерода.

Согласно [1–5], внутри частицы древесины проходят вторичные реакции, в ходе которых часть газообразных продуктов разлагается с выделением углерода.

Введем коэффициент φ , равный отношению массы m_2 углерода, полученного в ходе вторичных реакций, к массе газообразных продуктов пиролиза:

$$\varphi = \frac{dm_2}{\alpha_2 dm_1},$$

где α_2 – степень термического разложения газообразных продуктов пиролиза, определяется по (7).

Масса углерода, получаемого при разложении газообразных продуктов в процессе их прохождения через частицу:

$$m_2 = \int_{t=0}^t \varphi \alpha_2 \frac{dm_1}{dt} dt. \quad (15)$$

Подставив (13) и (14) в (9), получим уравнение для определения массы частицы древесины в ходе пиролиза с учетом вторичных реакций

$$m = m_0 - (m_0 - m_\infty) \left(1 - \exp\left(- (k_1 t)^{1/n_1}\right)\right) + \int_{t=0}^t \varphi \alpha_2 \frac{dm_1}{dt} dt. \quad (16)$$

С учетом (9)–(15) выражение (16) можно записать следующим образом:

$$m = m_0 - (m_0 - m_\infty) \left(1 - \exp\left(- (k_1 t)^{1/n_1}\right)\right) + \varphi \int_{t=0}^t \left(1 - \exp\left[- \left(\frac{L \frac{1}{0,0224} \sum_{i=1}^N M_i X_i \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} \frac{\pi d^2}{4} \left(\frac{\Pi}{100 - \Pi}\right) k_2 \right)^{1/n_2} \right] \right) \times \left((m_0 - m_\infty) \frac{1}{n_1} (k_1 t)^{1/n_1} t^{1/n_1 - 1} \exp\left(- (k_1 t)^{1/n_1}\right) \right) dt, \quad (17)$$

где k_2 – константа скорости термического разложения пиролизной смолы, с^{-1} , определяется по (8).

Исходя из (17), масса частицы при ее термохимической конверсии зависит не только от температуры и времени, но и от давления, ее длины, пористости, условий протекания первичных и вторичных реакций.

На основании приведенной математической модели разработана компьютерная программа, позволяющая исследовать влияние давления и других параметров пиролиза на выход древесного угля. Результаты расчетов с применением этой программы изложены далее в статье.

Результаты расчетно-теоретического исследования

Зависимости массового выхода твердых продуктов от времени пиролиза при температурах 300 и 400 °С, давлении 1 атм, длине частицы древесины 0,025 м и ее диаметре 0,008 м представлены на рис. 3.

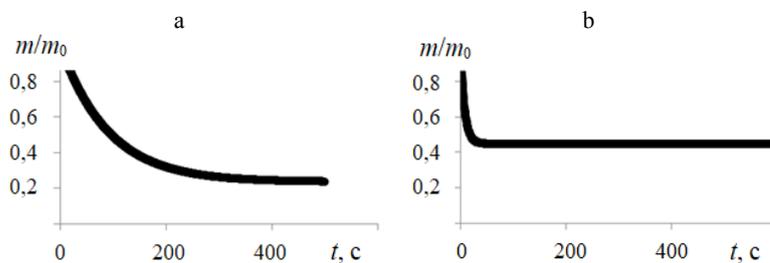


Рис. 3. Зависимость массового выхода твердых продуктов от времени пиролиза при температуре: а – 300 °С; б – 400 °С

Fig. 3. Calculation curves for the dependence of the mass yield of solid products on the pyrolysis time at temperatures: а – 300 °С; б – 400 °С

Расчетная зависимость конечного массового выхода твердых продуктов от температуры при давлениях от 1 до 10 атм, длине частицы древесины 0,025 м и ее диаметре 0,008 м приведена на рис. 4.

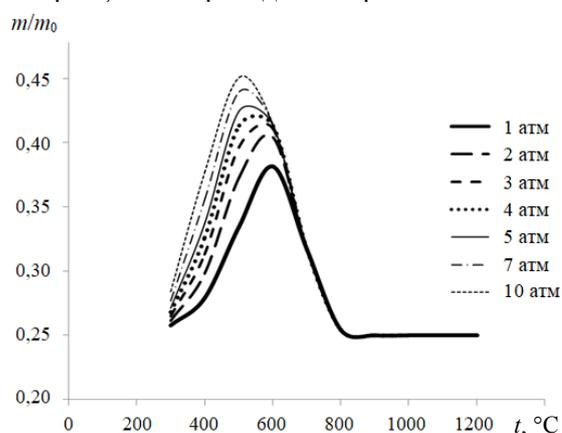


Рис. 4. Зависимость конечного массового выхода твердых продуктов от температуры при длине частицы древесины 0,025 м и ее диаметре 0,008 м

Fig. 4. The dependence of the final mass yield of solid products on temperature when the length of the wood particle is 0.025 m and its diameter is 0.008 m

Из рис. 4 видно, что при давлении 1 атм и длине частицы древесины 0,025 м максимальный выход твердых продуктов наблюдается при температуре 600 °С. С повышением давления значение максимального выхода увеличивается, а температура, при которой достигается максимум, снижается. Так, при давлении 10 атм максимальный выход твердых продуктов наблюдается при 500 °С, что в 1,18 раза больше, чем при 1 атм. При этом, чем больше длина частицы древесины, тем меньше температура достижения максимума. Так, расчеты по модели показали, что при длине частицы 0,5 м эта температура составит 400 °С при 10 атм (на графиках эти данные не указаны). Кривые зависимости массового выхода твердых продуктов от длины частиц при различных температурах и давлении 1 атм представлены на рис. 5.

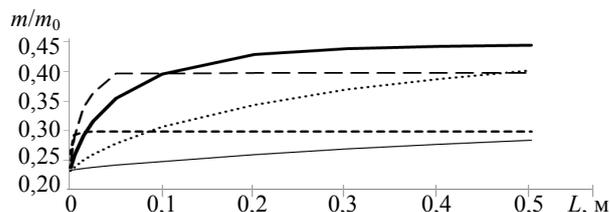


Рис. 5. Зависимость массового выхода твердых продуктов от длины частиц при температуре, °С: — — 300; — 400; — — — — 500; - - - - - 600; - - - - - 700

Fig. 5. Dependences of the mass yield of solid products on the length of the particle when the temperature, °С:
— — — — — 300; — 400; — — — — — 500; - - - - - 600; - - - - - 700

Из рис. 5 видно, что с увеличением длины частицы древесины выход твердых продуктов возрастает. Это хорошо согласуется с данными литературных источников. Также видно, что для частиц, длина которых ме-

нее 0,1 м, максимальный выход твердых продуктов достигается при температуре 600 °С, в то время как для частиц более 0,1 м температура достижения максимума снижается до 500 °С.

Сравнение расчетных данных по выходу древесного угля при проведении пиролиза при температуре 400 °С, давлении 7 атм и времени пиролиза 10 ч приведено на рис. 6.

Видно, что расчеты по модели хорошо согласуются с экспериментальными данными. Это свидетельствует об адекватности основных предположений, использованных при разработке модели пиролиза древесной биомассы, и значений констант скоростей химических процессов, рассчитанных по (6) и (8). Так, увеличение массового выхода древесного угля с ростом давления, при котором осуществляется процесс пиролиза, обусловлено

влиянием давления на диффузионный выход из пор, образующихся в первичном процессе термического разложения древесной биомассы газофазных компонентов. Этот вывод согласуется с предположениями [2–6].

Изложенное выше позволяет рекомендовать данную математическую модель для проведения оптимизации параметров пиролиза древесной биомассы, осуществляемой в условиях преимущественного образования древесного угля.

С формальной точки зрения, учет влияния давления на выход древесного угля в процессе термохимической конверсии можно осуществлять на основе предположения о том, что с ростом давления происходит снижение константы скорости первичной стадии разложения древесной биомассы. Такой метод использован в [12, 13], где получено хорошее соответствие экспериментальных данных расчетным значениям массового выхода древесного угля, образующегося в процессе пиролиза древесной биомассы при повышенном давлении. Однако при наличии данных по кинетике первичной стадии термического разложения древесной и другой биомассы, а также кинетических показателей о термическом разложении пиролизной смолы предложенная математическая модель позволит получить более глубокое представление об основных химических и физических процессах, протекающих при термохимической конверсии биомассы.

Следует отметить, что прямое использование представленной математической модели для расчета массового выхода древесного угля в случае других видов биомассы может привести к существенным отклонениям в расчетных и экспериментальных величинах. Наиболее вероятной причиной таких отклонений могут быть различия в константах скорости разложения пиролизуемой биомассы и разложения в порах компонентов, образующихся в первичной стадии пиролиза. Устранение возможного расхождения потребует кинетических исследований первичной стадии термического разложения биомассы, представляющей практический интерес для получения

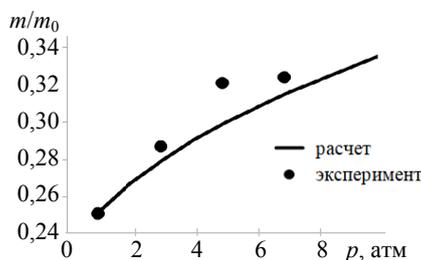


Рис. 6. Зависимость массового выхода твердого продукта от давления при температуре 400 °С и времени пиролиза 10 ч

Fig. 6. The dependence of mass yield of solid product on the pressure at a temperature of 400 °С and pyrolysis time of 10 h

древесного угля, а также кинетических исследований термического разложения газофазных компонентов, образующихся на первичной стадии пиролиза биомассы.

ВЫВОДЫ

1. Разработанная кинетическая модель термохимической конверсии древесной биомассы под давлением учитывает влияние вторичных химических реакций разложения сложных углеводов, выделяемых при пиролизе древесины. Это приводит к увеличению массового выхода твердых продуктов пиролиза (древесного угля).

2. На основании модели составлена программа расчета массового выхода древесного угля при пиролизе древесины под давлением. Проведены расчеты и выявлены оптимальные параметры процесса пиролиза древесины.

3. Результаты расчетов достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными, что указывает на адекватность предложенной кинетической модели и возможность использования ее при проектировании оборудования термохимической конверсии древесной биомассы с получением древесного угля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование процесса получения древесного угля путем пиролиза под давлением / С. В. Василевич [и др.] // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2017. № 3. С. 64–71.
2. Klason, P. Untersuchungen zur Holzverkohlung. I. Die Trockene Distillation der Cellulose / P. Klason, G. Heidenstam, E. Norlin // Z. Angew. Chem. 1909. Vol. 22, No 25. P. 1205–1214.
3. Klason, P. Untersuchungen zur Holzverkohlung. II. Die Trockene Distillation des Holzes von Kiefer, Fichte, Birke und Buche / P. Klason, G. Heidenstam, E. Norlin // Z. Angew. Chem. 1910. Vol. 23, No 27. P. 1252–1254.
4. Mok, W. S.-L. Effects of Pressure on Biomass Pyrolysis. I Cellulose Pyrolysis Products / W. S.-L. Mok, M. J. Jr. Antal // Thermochemica Acta. 1983. Vol. 68, No 2–3. P. 155–164.
5. Is Elevated Pressure Required to Achieve a High Fixed-Carbon Yield of Charcoal from Biomass. Part 1: Round-Robin Results for Three Different Corncob Materials / L. Wang [et al.] // Energy & Fuels. 2011. Vol. 25, No 7. P. 3251–3265.
6. Basile, L. The Role of Pressure in the Heat of Pyrolysis of a Lignocellulosic Biomass / L. Basile, A. Tugnoli, V. Cozzani // Chemical Engineering Transactions. 2015. Vol. 43. P. 451–456.
7. Хрусталева Б. М. Технология эффективного использования углеводородсодержащих отходов в производстве многокомпонентного твердого топлива / Б. М. Хрусталева, А. Н. Пехота // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 2. С. 122–140. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-2-122-140>.
8. Хрусталева Б. М. Твердое топливо из углеводородсодержащих, древесных и сельскохозяйственных отходов для локальных систем теплоснабжения / Б. М. Хрусталева, А. Н. Пехота // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 2. С. 147–158. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-2-147-158>.
9. Vyazovkin, S. Model-Free and Model-Fitting Approaches to Kinetic Analysis of Isothermal and Nonisothermal Data / S. Vyazovkin, Ch. A. Wight // Thermochemica Acta. 1999. Vol. 340–341. P. 53–68.
10. Малько, М. В. Исследование кинетики пиролиза древесной биомассы в изотермических условиях / М. В. Малько, С. В. Василевич // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2019. Т. 64, № 3. С. 321–331.
11. Исследование кинетики термического разложения пиролизной смолы / М. В. Малько [и др.] // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2016. № 4. С. 84–90.
12. Сафин, Р. Р. Математическое моделирование процесса пиролиза древесины при регулировании давления среды / Р. Р. Сафин, И. А. Валиев, Р. Г. Сафин // Лесной вестник. 2005. № 2. С. 168–173.

13. Методика расчета процесса термического разложения древесного сырья при регулировании давления среды / Р. Р. Хасаншин [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. 2014. № 10. С. 69–73.

Поступила 11.09.2019 Подписана в печать 03.12.2019 Опубликована онлайн 29.05.2020

REFERENCES

1. Vasilevich S. V., Malko M. V., Bahach U. N., Degterov D. V., Asadchyi A. N. (2017) Study of the Process of Charcoal Producing by Pyrolysis under Pressure. *Vesti Natsyanal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, (3), 64–71 (in Russian).
2. Klason P., Heidenstam G., Norlin E. (1909) Untersuchungen zur Holzverkohlung. I. Die Trockene Distillation der Cellulose. *Zeitschrift für Angewandte Chemie*, 22 (25), 1205–1214. <https://doi.org/10.1002/ange.19090222503>.
3. Klason P., Heidenstam G., Norlin E. (1910) Untersuchungen zur Holzverkohlung. II. Die Trockene Distillation des Holzes von Kiefer, Fichte, Birke und Buche. *Zeitschrift für Angewandte Chemie*, 23 (27), 1252–1254. <https://doi.org/10.1002/ange.19100232702>.
4. Mok W. S.-L., Antal M. J. Jr. (1983) Effects of Pressure on Biomass Pyrolysis. I Cellulose Pyrolysis Products. *Thermochimica Acta*, 68 (2–3), 155–164. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(83\)80221-4](https://doi.org/10.1016/0040-6031(83)80221-4).
5. Wang L., Trninc M., Skreiberg O., Gronli M., Considine R., Antal M. J. (2011) Is Elevated Pressure Required to Achieve a High Fixed-Carbon Yield of Charcoal from Biomass. Part 1: Round-Robin Results for three Different Corn cob Materials. *Energy & Fuels*, 25 (7), 3251–3265. <https://doi.org/10.1021/ef200450h>.
6. Basile L., Tugnoli A., Cozzani V. (2015) The Role of Pressure in the Heat of Pyrolysis of a Lignocellulosic Biomass. *Chemical Engineering Transactions*, 43, 451–456.
7. Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2016) Technology for Efficient Usage of Hydrocarbon-Containing Waste in Production of Multi-Component Solid Fuel. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (2), 122–140. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-2-122-140> (in Russian).
8. Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2017) Solid Fuel of Hydrocarbon, Wood and Agricultural Waste for Local Heat Supply Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (2), 147–158. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-2-147-158> (in Russian).
9. Vyazovkin S., Wight Ch. A. (1999) Model-Free and Model-Fitting Approaches to Kinetic Analysis of Isothermal and Nonisothermal Data. *Thermochimica Acta*, 340–341, 53–68. [https://doi.org/10.1016/s0040-6031\(99\)00253-1](https://doi.org/10.1016/s0040-6031(99)00253-1).
10. Malko M. V., Vasilevich S. V. (2019) Kinetics of Pyrolysis of Wood Biomass under Isothermal Conditions. *Vesti Natsyanal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, 64 (3), 321–331. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-321-331> (in Russian).
11. Malko M. V., Asadchyi A. N., Vasilevich S. V., Degterov D. V. (2016) Study of the Kinetics of Pyrolytic Tar Thermal Decomposition. *Vesti Natsyanal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical Series*, (4), 84–90 (in Russian).
12. Safin R. R., Valiev I. A., Safin R. G. (2005) Mathematical Modeling of Wood Pyrolysis Process at Medium Pressure Regulation. *Lesnoy Vestnik = Forestry Bulletin*, (2), 168–173 (in Russian).
13. Khasanshin R. R., Khaziyeva D. R., Valiev I. A., Timerbaeva A. L. (2014) A Method of Calculation of the Process of Thermal Decomposition of Wood Raw Materials in the Regulation of the Pressure of the Environment. *Vestnik Kazanskogo Tekhnologicheskogo Universiteta = Herald of Kazan Technological University*, (10), 69–73 (in Russian).

Received: 11 September 2019 Accepted: 3 December 2019 Published online: 29 May 2020