

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-355-365>

УДК 662.715.1

Моделирование процесса получения жидких продуктов пиролиза растительной биомассы с учетом скорости их охлаждения

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

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

²⁾Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. В статье представлены результаты расчетных и экспериментальных исследований термохимической конверсии древесной биомассы с получением жидких продуктов пиролиза с учетом скорости их охлаждения. Приведена методика расчета оптимальных режимных параметров (температуры и скорости охлаждения) технологического процесса. Предложено выражение для определения расхода древесного сырья в зависимости от температуры термохимической конверсии. Отмечено, что массовый выход жидких продуктов пиролиза из реактора слабо зависит от температуры и равен примерно 0,45 в диапазоне от 573 до 923 К. Для оценки влияния скорости их охлаждения использовано дифференциальное уравнение третьего порядка для модели, лимитированной скоростью реакции. Показано, что при охлаждении жидких продуктов пиролиза степень их конверсии стремится к определенному значению, отличному от 1. Получены расчетные данные по зависимости степени конверсии жидких продуктов пиролиза древесины от времени при различной скорости их охлаждения и температуре термохимической конверсии биомассы. Установлено, что отношение массового выхода охлажденных жидких продуктов пиролиза к начальной загрузке пиролизного реактора позволяет найти оптимальные условия охлаждения первичных продуктов пиролиза биомассы, осуществляемого при определенных температурах. Представлены графики зависимости указанного параметра от температуры процесса термохимической конверсии древесной биомассы для различных скоростей охлаждения. Показано, что максимально возможный их выход обеспечивается при температуре в реакторе 923–973 К и скорости охлаждения 700000–1200000 град./мин. Однако установление такой скорости – достаточно сложная техническая задача. Поэтому при осуществлении технологий получения жидких продуктов пиролиза ограничиваются температурами 773–800 К, при которых можно достичь практически реализуемой скорости охлаждения первичных продуктов разложения биомассы.

Ключевые слова: древесина, термохимическая конверсия, жидкие продукты пиролиза, охлаждение, предельная степень конверсии

Для цитирования: Моделирование процесса получения жидких продуктов пиролиза растительной биомассы с учетом скорости их охлаждения / С. В. Василевич [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 4. С. 355–365. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-355-365>

Адрес для переписки

Василевич Сергей Владимирович
Белорусская государственная академия авиации
ул. Уборевича, 77,
220096, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 249-97-65
svasilevich@yandex.ru

Address for correspondence

Vasilevich Siarhei V.
Belarusian State Academy of Aviation
77, Uborevich str.,
220096, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 249-97-65
svasilevich@yandex.ru

Modeling the Process of Obtaining Liquid Pyrolysis Products of Plant Biomass Taking into Account the Rate of their Cooling

S. V. Vasilevich¹⁾, M. V. Malko²⁾, D. V. Degterov²⁾, A. N. Asadchy²⁾

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

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

Abstract. The article presents the results of computational and experimental studies of thermochemical conversion of wood biomass to obtain liquid pyrolysis products taking into account their cooling rate. The method of calculating the optimal operating parameters (temperature and cooling rate) of the technological process is presented. An expression is proposed to determine the consumption of wood raw materials depending on the temperature of the thermochemical conversion process. It is noted that the mass yield of liquid pyrolysis products from the reactor poorly depends on temperature and is approximately 0.45 in the range from 573 to 923 K. To assess the effect of the cooling rate of liquid pyrolysis products, a third-order differential equation was used for a model limited by the reaction rate. It has been shown that when liquid pyrolysis products are cooled, the degree of their conversion tends to a certain value other than 1 (depending on the cooling rate). Calculated data on the dependence of the degrees of conversion of liquid wood pyrolysis products on time at different cooling rates and temperatures of thermochemical conversion of biomass have been obtained. It has been established also that the ratio of the mass yield of cooled liquid pyrolysis products to the initial loading of the pyrolysis reactor makes it possible to find optimal cooling conditions for the primary products of biomass pyrolysis carried out at certain temperatures. Graphs of the dependence of this parameter on the temperature of the thermochemical conversion of wood biomass for different cooling rates of liquid pyrolysis products are presented. It is shown that the maximum possible yield of liquid products is provided at a reactor temperature of 923–973 K and a cooling rate of 700000–1200000 degrees/min. However, achieving such cooling rates is rather a difficult technical task. Therefore, more limited temperature 773–800 K is accepted, at which a practically realizable cooling rate of primary biomass decomposition products is achieved.

Keywords: wood, thermochemical conversion, liquid pyrolysis products, cooling, limiting degree of conversion

For citation: Vasilevich S. V., Malko M. V., Degterov D. V., Asadchy A. N. (2022) Modeling the Process of Obtaining Liquid Pyrolysis Products of Plant Biomass Taking into Account the Rate of their Cooling. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (4), 355–365. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-355-365> (in Russian)

Введение

В промышленно развитых странах интенсивно совершенствуются такие направления переработки биомассы, как пиролиз, газификация, ожижение [1–9]. Среди современных технологий энергетического использования растительной биомассы наиболее универсальной, эффективной и дешевой, по мнению экспертов Международного энергетического агентства (IEA), является термохимическая конверсия методом пиролиза. Эта технология позволяет получать качественное, экологически безопасное твердое, жид-

кое и газообразное топливо практически из любого сырья, содержащего органические компоненты.

К основным преимуществам жидких продуктов пиролиза биомассы по сравнению с исходной биомассой при энергетическом использовании относятся: высокая энергетическая плотность, меньшие транспортные затраты, повышение технологичности энергетического использования, возможность прямого сжигания в турбинах и тихоходных дизельных двигателях с генерацией электроэнергии, получение коммерческих продуктов для химического синтеза, применения в качестве удобрения и сорбента.

Значительный интерес представляет применение жидких продуктов пиролиза биомассы в качестве связующих для композитных материалов (добавка в дорожные вяжущие до 20 %, улучшение адгезии вяжущих, стабилизация свойств битума, укрепление грунтов), а также сырья для химической промышленности, производства технического углерода, дорожного строительства.

Максимальный выход жидких продуктов термохимической конверсии органических материалов возможен только на основе быстрого пиролиза и только в том случае, если обеспечивается высокая скорость охлаждения продуктов реакции. Последнее требование обусловлено тем, что в процессе термохимической конверсии органических материалов образуются десятки высокорекреационных компонентов, вступающих в реакцию друг с другом. В случае медленного охлаждения реакционной смеси, покидающей реакционную зону, образовавшиеся продукты взаимодействуют между собой, превращаясь в смесь воды и диоксида углерода: компоненты пиролиза = $m\text{H}_2\text{O} + n\text{CO}_2$.

Таким образом, при осуществлении термохимической конверсии органических материалов с целью получения жидких продуктов важнейшей проблемой является быстрое охлаждение реакционной смеси, чтобы заморозить возможные химические реакции между реакционными продуктами, образовавшимися в реакционной зоне.

В статье рассмотрен случай термохимической конверсии крупных частиц (размер фракции около 2 см) в изотермических условиях при различных температурах с последующим охлаждением первичных продуктов пиролиза.

Основная часть

В ходе предыдущих исследований определено, что кинетика термохимической конверсии древесины при изотермических условиях описывается моделью Аврами – Ерофеева [10]. Степень конверсии при этом рассчитывается с помощью уравнения

$$\alpha = 1 - \exp(-kt)^{(1/n)}, \quad (1)$$

где k – константа скорости реакции, мин^{-1} ; t – время, мин; $n = 0,5$.

Константа скорости k определяется как

$$k = 7,78 \cdot 10^3 \exp(-64900/RT), \quad (2)$$

где R – универсальная газовая постоянная (8,314 Дж/(моль·К)); T – температура, К.

При этом производная степени конверсии по времени равна отношению массового расхода газообразных продуктов пиролиза к полной массе этих продуктов

$$\frac{d\alpha}{dt} = G/(m_0 - m_\infty), \quad (3)$$

где G – массовый расход, кг/мин; m_0 – начальная масса образца древесной биомассы, кг; m_∞ – конечная масса (масса угля), кг.

Поскольку процесс термохимической конверсии протекает при атмосферном давлении, примем массу угля как 24 % от начальной массы. Это значение определено в ходе исследований влияния давления на массовый выход угля [11, 12].

Тогда (3) запишем как

$$\frac{d\alpha}{dt} = G/0,76m_0. \quad (4)$$

В ходе расчетов (1) определено, что за время, равное $\sqrt{2}/k$, практически вся биомасса (около 99 %) разлагается. Значит, для обеспечения непрерывного процесса пиролиза за данный период времени в реактор должно поступить m_0 древесного сырья.

Таким образом, выражение для расчета массового расхода древесного сырья

$$G_d = \frac{k}{1,5} M_0 = 0,94kM_0, \quad (5)$$

где M_0 – начальная загрузка древесины в реактор, кг.

Зная выражение для константы скорости реакции термохимической конверсии древесной биомассы (2), можно получить зависимость массового расхода древесного сырья от температуры в реакторе (рис. 1).

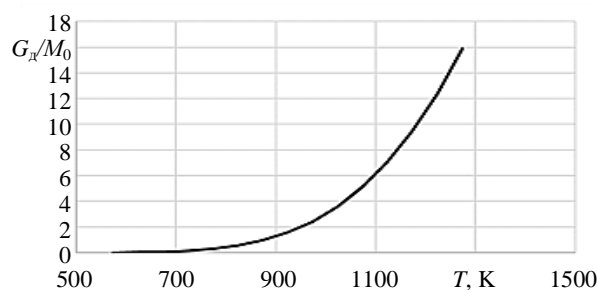


Рис. 1. Зависимости параметра G_d/M_0 от температуры

Fig. 1. Dependences of the G_d/M_0 characteristic on temperature

Газообразные продукты включают смолы, которые конденсируются при понижении температуры (до 573–373 К). Массовый выход жидких продуктов пиролиза при изотермической конверсии древесных частиц размером порядка 2 см слабо зависит от температуры процесса и равен примерно 0,45 в диапазоне температур термодимической конверсии от 573 до 923 К [13]. Тогда массовый выход смолы

$$G_{\text{см}} = 0,45G_{\text{д}}.$$

Однако известно, что смолы успевают частично разлагаться, если не обеспечить достаточно высокую скорость охлаждения продуктов конверсии. Это влияет на массовый выход жидких продуктов конверсии (он значительно снижается). Для более полного понимания влияния скорости охлаждения на долю разлагаемых продуктов конверсии необходимо исследовать кинетику термического разложения жидких продуктов пиролиза при неизотермическом процессе (в частности, в процессе охлаждения).

Степень конверсии пиролизных смол описывается выражением [14]

$$\alpha = 1 - \sqrt{\frac{1}{1 + 2kt}}. \quad (6)$$

Константа скорости определяется

$$k = 1,361 \cdot 10^8 \exp\left(-\frac{113744}{RT}\right), \quad (7)$$

$$T = T_0 + \beta t.$$

Выражения (6), (7) описывают процесс разложения смолы при повышении температуры с постоянной скоростью нагрева $\beta > 0$. Диапазон исследованных температур от 300 до 800 К. Изучены процессы разложения 400 мг смолы при скорости нагрева от 0,25 до 20 К/мин. Однако (6) нельзя использовать при описании разложения в процессе охлаждения (при $\beta < 0$). В таком случае применяют уравнение в дифференциальной форме

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{1}{\beta} k (1 - \alpha)^3. \quad (8)$$

Константа скорости k в (8) определяется по (7). Таким образом получаем зависимости степени термического разложения смол от времени при различных скоростях охлаждения и начальных температурах T_0 (рис. 2, 3).

В процессе охлаждения смол значения степеней разложения стремятся к некоторым предельным величинам (рис. 4). При $\ln \beta < 8$ и скорости охлаждения $\beta \approx 3000$ град./мин большая часть смол разлагается.

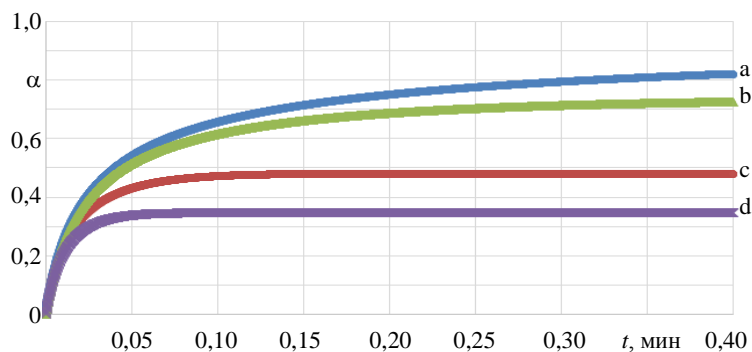


Рис. 2. Зависимость степени термического разложения смол от времени при начальной температуре 673 К и скорости охлаждения:
а – 1 К/мин; б – 10000; с – 50000; д – 100000 К/мин

Fig. 2. Dependences of the degree of thermal decomposition of resins on time when initial temperature is 673 K, while cooling rate is: a – 1 K/min; b – 10000; c – 50000; d – 100000 K/min

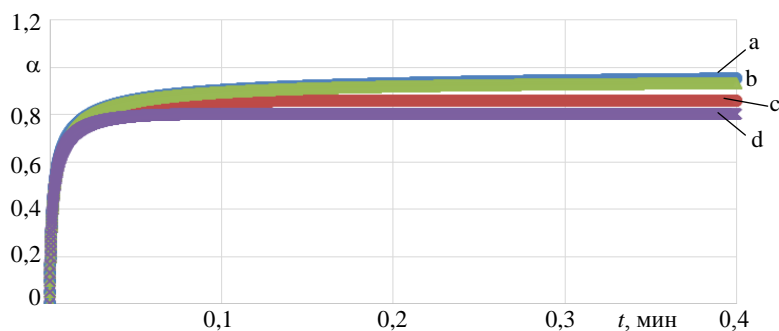


Рис. 3. Зависимость степени термического разложения смол от времени при начальной температуре 773 К и скорости охлаждения:
а – 1 К/мин; б – 10000; с – 50000; д – 100000 К/мин

Fig. 3. Dependences of the degree of thermal decomposition of resins on time when initial temperature is 773 K, while cooling rate is: a – 1 K/min; b – 10000; c – 50000; d – 100000 K/min

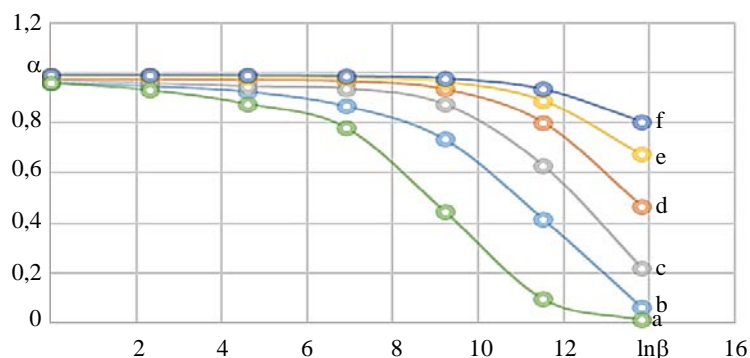


Рис. 4. Зависимость предельных степеней разложения от $\ln \beta$ при:
а – 350 °С; б – 400; с – 450; д – 500; е – 550; ф – 600 °С

Fig. 4. Dependence of the limiting degrees of decomposition on $\ln \beta$ at:
а – 350 °С; б – 400; с – 450; д – 500; е – 550; ф – 600 °С

Для описания указанных зависимостей построим графики функции (рис. 5)

$$\ln\left(-\frac{d\alpha}{dt}\right) = f(\ln\beta). \quad (9)$$

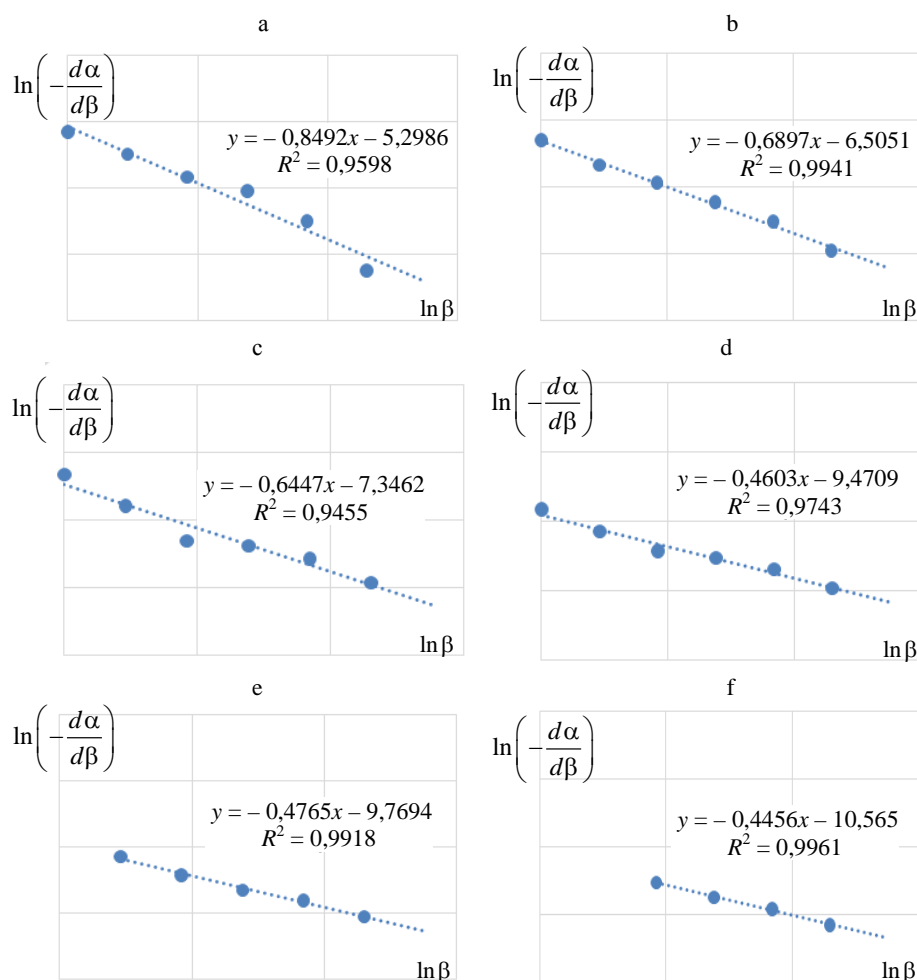


Рис. 5. Зависимость $\ln\left(-\frac{d\alpha}{d\beta}\right)$ от $\ln\beta$ при:

a – 350 °C; b – 400; c – 450; d – 500; e – 550; f – 600 °C

Fig. 5. Dependence of $\ln\left(-\frac{d\alpha}{d\beta}\right)$ on $\ln\beta$ at:

a – 350 °C; b – 400; c – 450; d – 500; e – 550; f – 600 °C

Из графиков видно, что (9) описывается линейным выражением

$$\ln\left(-\frac{d\alpha}{dt}\right) = A \ln\beta + B, \quad (10)$$

где A, B – коэффициенты, зависящие от начальной температуры (рис. 6).

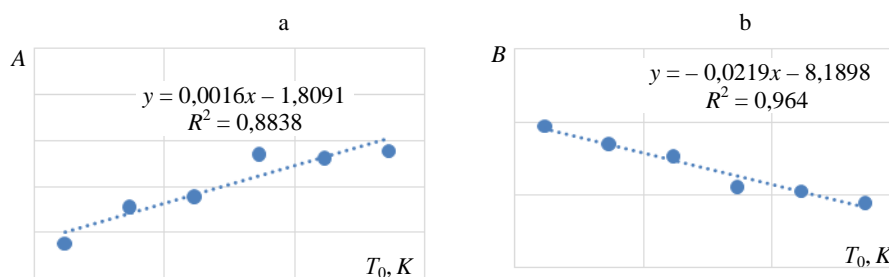


Рис. 6. Зависимость от начальной температуры T_0 коэффициента: а – А; б – В

Fig. 6. Dependence on the initial temperature T_0 of the coefficient of: а – А; б – В

Уравнения для расчета коэффициентов А, В:

$$A = 0,0016T_0 - 1,8091; \quad (11)$$

$$B = -0,0219T_0 + 8,1898. \quad (12)$$

Таким образом, зависимость предельного значения степени разложения смолы при ее охлаждении описывается выражением

$$\ln\left(-\frac{d\alpha}{d\beta}\right) = \ln\beta(0,0016T_0 - 1,8091) - 0,0219T_0 + 8,1898. \quad (13)$$

Решение (13) имеет вид

$$\alpha = 1 - \frac{\exp(8,1898 - 0,0219T_0)}{(0,0016T_0 - 0,8091)^2} \beta^{(0,0016T_0 - 0,8091)^2}. \quad (14)$$

В качестве основного показателя при выборе режимов пиролиза и охлаждения примем отношение массового выхода охлажденных жидких продуктов пиролиза к начальной загрузке пиролизного реактора:

$$\gamma = (G_{см}/M_0)(1 - \alpha) = 0,45(G_д/M_0)(1 - \alpha); \quad (15)$$

$$\gamma = 0,45 \frac{G_д}{M_0} \frac{e^{(8,1898 - 0,0219T_0)}}{(0,0016T_0 - 0,8091)^2} \beta^{(0,0016T_0 - 0,8091)^2}. \quad (16)$$

Данный параметр показывает влияние температуры на выход первичных продуктов пиролиза и процесс их термического разложения до охлаждения. На рис. 7 представлены графики зависимости γ от начальной температуры при различных скоростях охлаждения.

Анализ графиков (рис. 7) позволяет определить оптимальные режимы для получения жидких продуктов пиролиза: температура в реакторе 923–973 К, скорость охлаждения 700000–1200000 град./мин ($\ln\beta = 11–14$). Однако установление такой скорости охлаждения – достаточно сложная

техническая задача. Необходимо, чтобы первичные продукты конверсии за время, равно около 0,05 с, смогли успеть охладиться до 373 К. Поэтому при осуществлении технологий получения жидких продуктов пиролиза ограничиваются температурами 773–800 К, при которых можно достичь практически реализуемой скорости охлаждения первичных продуктов разложения биомассы.

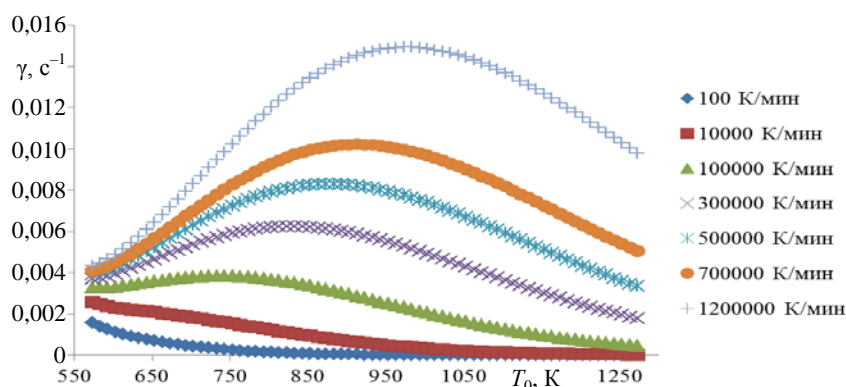


Рис. 7. Графики зависимости γ от начальной температуры T_0 при различных скоростях охлаждения

Fig. 7. Graphs of dependence of γ on the initial temperature at different cooling rates

ВЫВОДЫ

1. Представлены результаты расчетных и экспериментальных исследований термохимической конверсии древесной биомассы с получением жидких продуктов пиролиза с учетом скорости их охлаждения. Приведена методика расчета оптимальных режимных параметров технологического процесса. Предложено выражение для определения расхода древесного сырья в зависимости от температуры процесса термохимической конверсии. Показано, что при охлаждении жидких продуктов пиролиза степень их конверсии стремится к определенному значению, отличному от 1. Приведены графики зависимости предельных степеней конверсии жидких продуктов пиролиза древесины от времени при различных скоростях их охлаждения и температурах термохимической конверсии биомассы. Показано, что зависимость предельной степени конверсии от скорости охлаждения имеет степенной вид.

2. Разработана математическая модель расчета пиролиза биомассы и последующего охлаждения продуктов разложения. Согласно данным расчетного исследования на основе этой модели, максимальное количество жидких продуктов пиролиза древесной биомассы можно получить при температуре 723–973 К (температура в реакционной зоне) и скорости охлаждения 700000–1200000 град./мин.

3. При выборе оптимальных режимов пиролиза и охлаждения впервые предложено использовать отношение массового выхода охлажденных жидких продуктов пиролиза к начальной загрузке пиролизного реактора.

Данный параметр показывает влияние температуры на выход первичных продуктов пиролиза и процесс их термического разложения до охлаждения. Это позволяет определять оптимальные режимы и конструктивные особенности при разработке оборудования термохимической конверсии органического материала.

4. Результаты изучения влияния скорости охлаждения первичных продуктов конверсии приведены для случая крупных частиц, пиролизующихся при изотермических условиях. Планируются дальнейшие исследования и доработка расчетной модели с учетом размера частиц древесной биомассы (традиционно жидкие продукты получают путем быстрого пиролиза мелкодисперсных частиц), давления, влажности и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корсак, Е. П. Формирование системы угроз энергетической безопасности Республики Беларусь // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 4. С. 388–398. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-388-398>.
2. Фортов, В. Е. Состояние развития возобновляемых источников энергии в мире и в России / В. Е. Фортов, О. С. Попель // Теплоэнергетика. 2014. № 6. С. 4–13.
3. Bridgwater, A. V. Renewable Fuels and Chemicals by Thermal Processing of Biomass / A. V. Bridgwater // Chemical Engineering Journal. 2003. Vol. 91, Iss. 2–3. P. 87–102. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00142-0](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00142-0).
4. Mohan, D. Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-Oil: A Critical Review / D. Mohan, Ch. U. Pittman, P. H. Steele // Energy and Fuels. 2006. Vol. 20, Iss. 3. P. 848–889. <https://doi.org/10.1021/ef0502397>.
5. Babu, B. V. Heat Transfer and Kinetics in the Pyrolysis of Shrinking Biomass Particle / B. V. Babu, A. S. Chaurasia // Chemical Engineering Science. 2004. Vol. 59, Iss. 10. 1999–2012. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.01.050>.
6. Miller, R. S. A Generalized Biomass Pyrolysis Model Based on Superimposed Cellulose, Hemicellulose and Lignin Kinetics / R. S. Miller, J. Bellan // Combustion Science and Technology. 1997. Vol. 126, Iss. 1–6. P. 97–137. <https://doi.org/10.1080/00102209708935670>.
7. Lewis, F. M. Pyrolysis of Biomass / F. M. Lewis, C. M. Ablow // A Conference on Capturing the Sun Through Bioconversion, March 10–12. Washington, 1976.
8. Никитин, В. М. Химия древесины и целлюлозы / В. М. Никитин, А. В. Оболенская, В. П. Щеголев. М.: Лесная промышленность, 1978. 366 с.
9. Chan, W.-C. R. Modelling and Experimental Verification of Physical and Chemical Processes during Pyrolysis of a Large Biomass Particle / W.-C. R. Chan, M. Kelbon, B. V. Krieger // Fuels. 1985. Vol. 64, Iss. 11. P. 1505–1513. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(85\)90364-3](https://doi.org/10.1016/0016-2361(85)90364-3).
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. 321–332. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-321-331>.
11. 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.
12. 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>.
13. Дмитриев, Г. М. Исследование термохимической конверсии биомассы для получения различных видов топлив / Г. М. Дмитриев, В. Н. Кожурин, М. В. Малько // Энергетика Молдовы – 2012: сб. материалов Междунар. конф. Кишинева, Молдова, 4–7 октября 2012. Кишинева, 2012. С. 324–330.
14. Новый метод анализа термогравиметрических данных / М. В. Малько [и др.] // Изв. ВУЗов. Химия и химическая технология, 2021. Т. 64, Вып. 3. С. 24–32. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216403.6348>.

Поступила 16.12.2021 Подписана в печать 22.02.2022 Опубликована онлайн 29.07.2022

REFERENCES

1. Korsak E. P. (2019) Formation of the System of Threats to Energy Security of the Republic of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (4), 388–398. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-388-398> (in Russian).
2. Fortov V. E., Popel' O. S. (2014) The Current Status of the Development of Renewable Energy Sources Worldwide and in Russia. *Thermal Engineering*, 61, 389–398. <https://doi.org/10.1134/S0040601514060020>.
3. Bridgewater A. V. (2003) Renewable Fuels and Chemicals by Thermal Processing of Biomass. *Chemical Engineering Journal*, 91 (2–3), 87–102. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00142-0](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00142-0).
4. Mohan D., Pittman Ch. U., Steele P. H. (2006) Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-Oil: A Critical Review. *Energy and Fuels*, 20 (3), 848–889. <https://doi.org/10.1021/ef0502397>.
5. Babu B. V., Chaurasia A. S. (2004) Heat Transfer and Kinetics in the Pyrolysis of Shrinking Biomass Particle. *Chemical Engineering Science*, 59 (10), 1999–2012. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.01.050>.
6. Miller R. S., Bellan J. (1997) A Generalized Biomass Pyrolysis Model Based on Superimposed Cellulose, Hemicellulose and Lignin Kinetics. *Combustion Science and Technology*, 126 (1–6), 97–137. <https://doi.org/10.1080/00102209708935670>.
7. Lewis F. M., Ablow C. M. (1976) Pyrogas From Biomass. *A Conference on Capturing the Sun Through Bioconversion*. March 10–12. Washington.
8. Nikitin V. M., Obolenskaya A. V., Shchegolev V. P. (1978) *Chemistry of Wood and Cellulose*. Moscow, Lesnaya Promyshlennost' Publ. 366 (in Russian).
9. Chan W.-C. R., Kelbon M., Krieger B. B. (1985) Modelling and Experimental Verification of Physical and Chemical Processes during Pyrolysis of a Large Biomass Particle. *Fuels*, 64 (11), 1505–1513. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(85\)90364-3](https://doi.org/10.1016/0016-2361(85)90364-3).
10. Malko M. V., Vasilevich S. V. (2019) Kinetics of Pyrolysis of Wood Biomass under Isothermal Conditions. *Vesti Natsyonal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, 64 (3), 321–332. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-321-331> (in Russian).
11. Vasilevich S. V., Malko M. V., Bahach U. N., Degterov D. V., Asadchy A. N. (2017) Study of the Process of Charcoal Producing by Pyrolysis under Pressure. *Vesti Natsyonal'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).
12. Vasilevich S. V., Malko M. V., Degterov D. V., Asadchy A. N. (2020) Computational Study of the Yield of Solid Wood Pyrolysis Products under High Pressure. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (3), 253–263. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-253-263> (in Russian).
13. Dmitriev G. M., Kozhurin V. N., Malko M. V. (2012) Investigation of Thermochemical Conversion of Biomass for Obtaining Various Types of Fuels. *Energetika Moldovy – 2012: Sb. Materialov Mezhdunar. Konf. Kishenev, Moldova, 4–7 Oktyabrya 2012* [Power Engineering of Moldova – 2012: Collected Materials of the International Conference. Kishinev, October 4–7, 2012]. Kishinev, 324–330 (in Russian).
14. Malko M. V., Vasilevich S. V., Mitrofanov A. V., Mizonov V. E. (2021) An Innovate Method of Thermogravimetric Data Analysis. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii: Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya* [The Journal ChemChemTech], 64 (3), 24–32. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216403.6348> (in Russian).