

DOI 10.23859/1994-0637-2018-1-83-6

УДК 674.047.3

© Синицын Н.Н., Телин Н.В., Грызлов В.С., Андреев А.С., Виноградова М.С.,
Гаркавченко Э.В., Гневашева Т.В., Кузнецова В.П., Павлова А. И., 2018

Синицын Николай Николаевич

Доктор технических наук, профессор,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: sinitsyn@chsu.ru

Телин Николай Владимирович

Доктор технических наук, профессор,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: telin_nv@mail.ru

Грызлов Владимир Сергеевич

Доктор технических наук, профессор,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: pte@chsu.ru

Андреев Александр Сергеевич

Кандидат технических наук, преподаватель,
Череповецкое высшее военное инженерное
училище радиоэлектроники
(Череповец, Россия)
E-mail: pte@chsu.ru

Виноградова Мария Сергеевна

Инженер, ООО «Севесталь-проект»
(Череповец, Россия)
E-mail: mashkavinog@rambler.ru

Гаркавченко Элина Вадимовна

Инженер, ПАО «Северсталь»
(Череповец, Россия)
E-mail: sawjstina@mail.ru

Гневашева Татьяна Вадимовна

Инженер, ПАО «Северсталь»
(Череповец, Россия)
E-mail: tatyana_gnevasheva@mail.ru

Кузнецова Виктория Павловна

Инженер, ПАО «Северсталь»
(Череповец, Россия)
E-mail: k_v_p95@mail.ru

Павлова Алина Игоревна

Инженер, ООО «АВПоиск»
(Череповец, Россия)
E-mail: paw.lina2011@yandex.ru

Sinitsyn Nikolay Nikolaevich

Doctor of Technical Sciences, professor,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: sinitsyn@chsu.ru

Telin Nikolay Vladimirovich

Doctor of Technical Sciences, professor,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: telin_nv@mail.ru

Gryzlov Vladimir Sergeevich

Doctor of Technical Sciences, professor,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: pte@chsu.ru

Andreev Alexander Sergeevich

PhD in Technical Sciences, teacher,
of the Cherepovets Higher Military School
of Engineering and Radioelectronics
(Cherepovets, Russian)
E-mail: pte@chsu.ru

Vinogradova Maria Sergeyevna

Engineer, ООО “Severstal-project”
(Cherepovets, Russia)
E-mail: mashkavinog@rambler.ru

Garkavchenko Elina Vadimovna

Engineer, PJSC “Severstal”
(Cherepovets, Russia)
E-mail: sawjstina@mail.ru

Gnevacheva Tatyana Vadimovna

Engineer, PJSC “Severstal”
(Cherepovets, Russia)
E-mail: tatyana_gnevasheva@mail.ru

Kuznetsova Victoria Pavlovna

Engineer, PJSC “Severstal”
(Cherepovets, Russia)
E-mail: k_v_p95@mail.ru

Pavlova Alina Igorevna

Engineer, ООО “AVSearch”
(Cherepovets, Russia)
E-mail: paw.lina2011@yandex.ru

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ
ВЫХОДА ВЛАГИ И ЛЕГУЧИХ ВЕЩЕСТВ
В ПРОЦЕССЕ НАГРЕВА ДРЕВЕСНОЙ
БИОМАССЫ (КОРЫ)¹**

**STUDY ON OPPORTUNITIES
AND EVALUATION OF TIME OF WOOD
CRUDE DRYING WITH WASTE
HIGH-TEMPERATURE SMOKE GASES
OF BOILER UNITS**

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-48-350810.

Аннотация. В работе предложена модель процесса горения на стадиях сушки и выхода летучих веществ из куска высоковлажной коры древесины, состоящая из системы нестационарных дифференциальных уравнений. Получены зависимости числа Фурье от критерия Коссовича и критерия температурных отношений.

Ключевые слова: модель, древесная кора, сушка, влага, летучие вещества, фазовый переход влаги

Abstract. In this article a model of the combustion process at the stages of drying and exit of volatile substances from the bush of the high-moisture crust of wood, consisting of a system of non-stationary differential equations is suggested. Correlation of the Fourier number, the Kosovich test and the temperature relationship criterion are obtained.

Keywords: model, tree bark, drying, moisture, volatile substances, phase transition of moisture.

Введение

Технологии получения энергии из древесных отходов непрерывно развиваются и совершенствуются. Основной особенностью твердых природных топлив является их способность при нагревании выделять продукты термического разложения органической массы (летучие). Точный расчет состава продуктов термолитиза твердых природных топлив в зависимости от температуры и времени представляет собой сложную задачу, причем кинетические характеристики, необходимые для этого расчета, еще не обобщены. В ряде инженерных задач не требуется знать состав продуктов термолитиза, но нужны ответы на более простые вопросы: какое количество летучих может выделиться из топлива, за какое время и в каком процентном отношении произойдет разложение топлива при его термолитизе в условиях данного промышленного агрегата. Определяющим фактором процесса горения является динамика выхода влаги и летучих веществ из древесной биомассы при различных температурах. Для организации процесса горения побочных продуктов заготовки, обработки и переработки древесины необходимо знать кинетические характеристики этого процесса. Решение этой проблемы позволит обеспечить безотходность переработки древесины на деревоперерабатывающих предприятиях.

Основная часть

В упрощенном виде процесс горения древесной коры может быть разделен на четыре зависящих от температуры стадии: сушка; выход летучих компонентов; возгорание газообразных летучих веществ и горение твердого углерода. После попадания топлива в топку его температура сразу начинает увеличиваться. Испарение влаги происходит при достаточно низкой температуре (50...100 °C) [2]–[4]. На испарение воды, содержащейся в исходном топливе, уходит часть энергии, выделяемой в процессе горения топлива, что уменьшает температуру в топке и замедляет процесс его сжигания. Процесс выделения летучих веществ (прежде всего углеводов) начинается при достижении температуры топлива 100...105 °C [2]–[4]. В результате испарения влаги и выделения летучих веществ топливные частички становятся пористыми. Скорость выхода летучих веществ увеличивается с повышением температуры. Сначала происходит разложение гемицеллюлозы и затем, при более высокой температуре, разложение целлюлозы. Полное выделение большинства летучих веществ происходит при температуре до 400 °C [2]–[4]. С дальнейшим повышением температуры скорость выхода летучих компонентов резко возрастает. Однако при температуре 400...500 °C может наблюдаться низкая скорость выхода летучих веществ, определяемая скоростью разложения лигнина, увеличивающейся с повышением температуры. Возгорание газообразных летучих веществ происходит около поверхности

твердого слоя топлива при температуре около 600 °С. Газы сгорают в виде пламени, которое нагревает твердые частицы. При сжигании древесины приблизительно 80 % энергии выделяется в виде газов, а оставшаяся часть в виде древесного угля.

Горение твердого углерода происходит в горящем слое при температуре выше 800 °С. Основное тепловыделение при сжигании древесной коры ввиду высокого выхода горючих веществ у этих топлив происходит в топочном объеме, а не в слое топлива. Необходимым условием использования древесной коры в качестве экологически приемлемого вида топлива является создание условий ее эффективного и полного сгорания. Это достигается пространственной и временной организацией процесса горения на всех его стадиях. Целью данной работы является моделирование динамики выхода влаги и летучих веществ в процессе нагрева древесной биомассы (коры).

На основе анализа экспериментальных данных, отестированных методик расчета отдельных процессов составлена модель процесса горения на стадиях сушки и выхода летучих веществ из куска высоковлажной коры древесины, состоящая из системы нестационарных дифференциальных уравнений: уравнения теплопроводности, уравнения испарения влаги и выхода летучих компонентов, учитывающих перемещение фронтов испарения влаги и выхода летучих веществ.

Прогрев частицы коры на стадиях сушки и выхода летучих компонентов описывается сквозным уравнением теплопроводности с переменными граничными условиями третьего рода, учитывающими теплообмен конвекцией и тепловым излучением. Для периода сушки и выхода летучих веществ система уравнений имеет вид:

$$c_{эф}(T) \cdot \rho(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (1)$$

интегрируемое в области: $0 \leq x \leq S, \quad 0 \leq \tau \leq \tau_k$

начальное условие: при: $\tau = 0 \quad T|_{\tau=0} = T^0$;

граничное условие: при $x = 0 \quad -\lambda(T) \frac{dT}{dx} = \alpha(T - T_{cp})$;

при $x = S, \quad -\lambda(T) \frac{dT}{dx} = 0$,

где ρ – плотность материала; α – коэффициент теплоотдачи; S – половина толщины пластины; T_{cp} – температура среды; T^0 – начальная температура материала; λ – коэффициент теплопроводности.

При этом выделение теплоты фазового перехода в уравнении (1) учитывают с помощью эффективной теплоемкости $c_{эф}$, задаваемой выражением:

$$C_{эф} = \begin{cases} c_1(T), & T > T_{л}; \\ c(T_c) \cdot \psi + c(T_{л}) \cdot (1 - \psi) + \frac{g \cdot L}{\Delta T}, & T_{л} \leq T \leq T_c \\ c_2(T), & T < T_c \end{cases}$$

коэффициент теплопроводности и плотность определяют по формулам:

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_1, & T < T_c; \\ \lambda_1 \cdot \psi + \lambda_2 \cdot (1 - \psi), & T_c \leq T \leq T_{л} \\ \lambda_2, & T > T_{л}. \end{cases}$$

$$\rho = \begin{cases} \rho_1, & T < T_c; \\ \rho_1 \cdot \Psi + \rho_2 \cdot (1 - \Psi), & T_c \leq T \leq T_n; \\ \rho_2, & T > T_n, \end{cases}$$

где $T_n = T_{\phi} + 19,5$, $T_c = T_{\phi} - 37$ – фиктивные температуры начала и окончания фазового перехода воды; $c(T)$ – теплоемкость материала; c_1 и c_2 – теплоемкость сухого и влажного слоев материала; ρ_1 и ρ_2 – плотность сухого и влажного слоев материала; λ_1 и λ_2 – коэффициенты теплопроводности сухого и влажного слоев материала; g – доля влаги в элементарном объеме материала; S – половина толщины слоя материала; L – удельная теплота фазового перехода влаги; Ψ – доля влажного материала; T_{ϕ} – температура фазового перехода воды.

Величина Ψ определяется по формуле:

$$\Psi = \begin{cases} 1, & T < T_c; \\ \frac{T_n - T}{T_n - T_c}, & T_c < T < T_n; \\ 0, & T > T_n. \end{cases}$$

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_n,$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией; α_n – коэффициент теплоотдачи излучением.

Процесс термоллиза твердого топлива представляет собой разрыв физико-химических связей внутри его составляющих с последующим весьма быстрым образованием конечных продуктов разложения. Поэтому можно выделить отдельные группы связей, которые разрушаются при определенном условии с определенной скоростью, примерно одинаковой для данной группы связей. В этом случае скорость выделения продуктов термоллиза, образующихся в результате разрушения такой группы связей, можно записать следующим образом [5]:

$$\frac{1}{c_{0i}} \cdot \frac{dV_i}{d\tau} = k_i \cdot \left(1 - \frac{V_i}{c_{0i}}\right)^{n_p},$$

где V_i – доля продуктов термоллиза i -й группы в общем количестве продуктов термоллиза; τ – время разрушения связей i -й группы; c_{0i} – доля продуктов термоллиза i -й группы в общем количестве продуктов термоллиза, получающаяся при полном разрушении связей данной группы ($0 \leq V_i \leq c_{0i}$); n_p – порядок реакции (ниже принимаемый равным 1, что для реакций разложения в первом приближении допустимо);

$$k_i = k_{0i} \cdot e^{-\frac{E_0}{RT}},$$

где k_i – константа скорости реакции, характеризующей разрушение связи данной группы; E_0 – энергия активации, МДж/кмоль; R – универсальная газовая постоянная; T – температура материала в узле; k_{0i} – предэкспоненциальный множитель, 1/с; τ – время.

При проведении расчетов принято, что максимальный выход летучих веществ в расчете на сухую массу коры древесины составляет $V_{\max}^c = 83,6 \%$; $E = 59,9$ МДж / кмоль; $k_i = 38,3 \text{ с}^{-1}$ [5]. В формуле (1) принято, что $c_{oi} = 1$.

В этом случае скорость выделения продуктов термоллиза, образующихся в результате разрушения такой группы связей, описывается уравнением (2):

$$\frac{dV}{d\tau} = k_{oi} \exp\left[\frac{-E}{RT_4}\right](1-V), \quad \varepsilon \leq x \leq s. \quad (2)$$

Изменение массы образца коры древесины в течении времени прогрева за счет выхода влаги и летучих веществ описывается уравнением

$$\frac{dm_q}{d\tau} = \frac{dW}{d\tau} + \frac{dV}{d\tau}. \quad (3)$$

Решение системы уравнений (1)–(3) получено численным методом. Уравнение (1) решено методом конечных разностей по явной схеме аппроксимации производных. Уравнения (2), (3) решены методом Рунге-Кутты четвертого порядка.

На рис. 1 представлена зависимость изменения температуры поверхности образца от времени прогрева. Начиная с температуры 180°C , температура поверхности резко увеличивается и из поверхностных слоев увеличивается выход летучих веществ.

На рис. 2 представлен взаимосвязь чисел Fo от Ko [1] при отсутствии излучающего объема $W_i^r = 85 \%$. Из рисунка видно, что зависимость чисел Fo и Ko имеет вид параболы, где $Fo = \frac{\alpha_2 \cdot \tau}{\delta^2}$ – число Фурье, $Ko = \frac{L \cdot g \cdot \rho_2}{c_1 \rho_1 (T_\phi - T_0)}$.

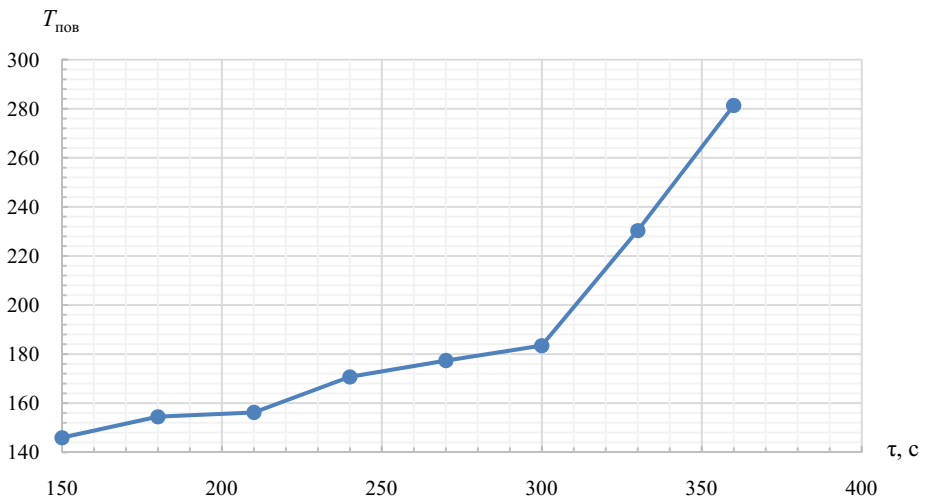


Рис. 1. Зависимость температуры поверхности куска коры древесины от времени при $T_{cp} = 352^\circ\text{C}$

На рис. 3 представлено сравнение расчетных и экспериментальных данных по выходу влаги летучих веществ. Начиная с момента времени $\tau = 270$ с, масса образца изменяется незначительно, а начиная с момента времени -300 с масса образца начинает снова уменьшаться за счет выхода летучих веществ. Оценка погрешности отклонения расчетных, по предложенной методике, и экспериментальных данных допустима.

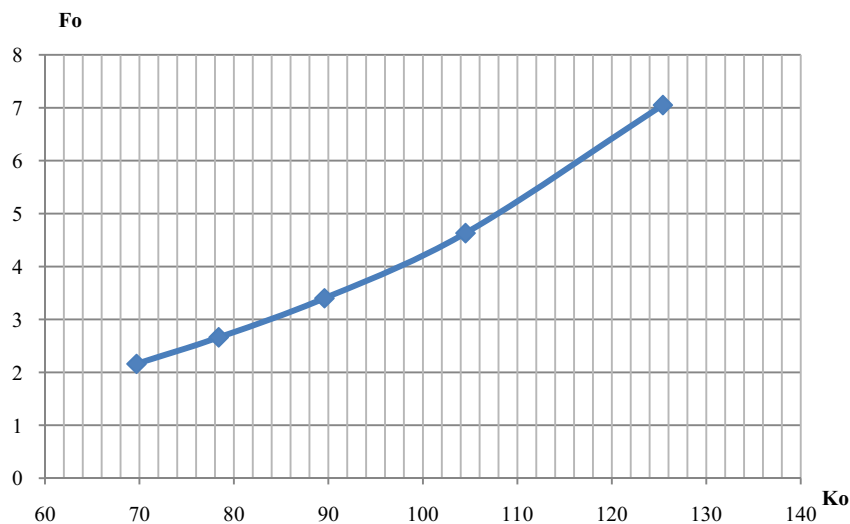


Рис. 2. Зависимость числа Fo от Ko при отсутствии излучающего объема при $W'_r = 85\%$.

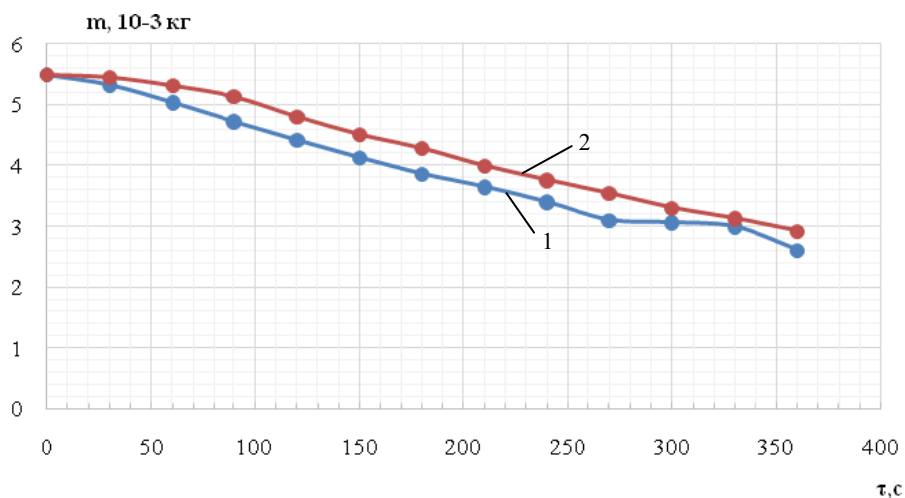


Рис. 3. Зависимость массы прогреваемого куска коры от времени
1 – расчетные данные, 2 – экспериментальные данные

Таким образом, предложенная математическая модель прогрева влажной коры древесины достаточно точно описывает процесс горения на стадиях сушки и выхода летучих веществ. Отклонение расчетных данных от экспериментальных не превышает 12 %. Математическую модель можно использовать при разработке технических устройств, обеспечивающих сушку коры древесины и выход летучих веществ, например, при сжигании высоковлажной коры.

Выводы

Разработана математическая модель прогрева высоковлажной коры древесины с учетом фазового перехода влаги и выхода летучих веществ. Получены графические зависимости безразмерного времени прогрева высоковлажной коры древесины от характеризующих отношение количества теплоты, выделяющегося при испарении влаги, к количеству теплоты идущего на прогрев материала до температуры греющей среды и критерия K_T .

Литература

1. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
2. Любов В.К., Любов С.В. Повышение эффективности энергетического использования биотоплива. Архангельск, 2010. 496 с.
3. Любов В.К. Энергетическое использование биотоплива. Архангельск: АГТУ, 2007. 156 с.
4. Марьяндышев П.А., Чернов А.А., Любов В.К. Анализ термогравиметрических и кинетических данных различных видов древесного биотоплива северо-западного региона Российской Федерации // Лесной журнал. 2016. №1. С. 167–172.
5. Померанцев В.В. и др. Основы практической теории горения. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 312 с.

References

1. Lykov A.V. *Teoriia teploprovodnosti* [Theory of heat conductivity]. Moscow: Vysshaya shkola, 1967. 600 p.
2. Lyubov V.K., Lyubov S.V. *Povysheniye effektivnosti energeticheskogo ispol'zovaniia biotopлива* [Increase the effectiveness of energy use of biofuels]. Arkhangel'sk, 2010. 496 p.
3. Lyubov V.K. *Energeticheskoye ispol'zovaniye biotopлива* [Energy use of biofuel]. Arkhangel'sk: AGTU, 2007. 156 p.
4. Mar'iandyshch P.A., Chernov A.A., Lyubov V.K. Analiz termogravimetriceskikh i kineticheskikh dannykh razlichnykh vidov drevesnogo biotopлива severo-zapadnogo regiona Rossiyskoi Federatsii [Analysis of thermogravimetric and kinetic data of different types of wood biofuel in the northwestern region of the Russian Federation]. *Lesnoi zhurnal* [Forest Journal], 2016, no. 1, pp. 167–172.
5. Pomerantsev V.V. *Osnovy prakticheskoi teorii goreniia* [Bases of the practical theory of burning]. Leningrad: Energoatomizdat, 1986. 312 p.

Для цитирования: Синицын Н.Н., Телин Н.В., Грызлов В.С., Андреев А.С., Виноградова М.С., Гаркавченко Э.В., Гневашева Т.В., Кузнецова В.П., Павлова А.И. Моделирование динамики выхода влаги и летучих веществ в процессе нагрева древесной биомассы (коры) // Вестник Череповецкого государственного университета. 2018. №2(83). С. 47–53. DOI 10.23859/1994-0637-2018-1-83-6

For citation: Sinitsyn N.N., Telin N.V., Gryzlov V.S., Andreev A.S., Vinogradova M.S., Garkavchenko E.V., Gnevacheva T.V., Kuznetsova V.P., Pavlova A.I. Study on opportunities and evaluation of time of wood crude drying with waste high-temperature smoke gases of boiler units. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2018, no. 2 (83), pp. 47–53. DOI 10.23859/1994-0637-2018-1-83-6