

Н.Н. Синицын, Н.В. Телин, Л.А. Полеводова

**ДИНАМИКА ПРОГРЕВА
ОДИНОЧНОГО ВЫСОКОВЛАЖНОГО КУСКА ДРЕВЕСНОЙ КОРЫ,
НАХОДЯЩЕГОСЯ В ПЛОТНОМ СЛОЕ,
ПРОДУВАЕМОМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ**

Введение. Эффективность энергетического использования древесной коры в процессе ее сжигания слоевым способом в топках теплогенераторов, в основном, определяется фракционным составом коры, динамикой сушки и выхода летучих [Любов, 2014; Чернов и др., 2015; Марьяндышев и др., 2016; Синицын и др., 2018]. Температурные диапазоны этих процессов известны, а временные – зависят от геометрических параметров одиночных кусков коры, их исходной влажности и интенсивности прогрева. В учебном пособии (Любов В.К. и Любова С.В. «Повышение эффективности энергетического использования биотоплив», 2010 г.) экспериментально установлено, что сушка коры происходит в диапазоне температур 308...363К, а температура начала выхода летучих веществ составляет 413К. Исходная влажность коры после мокрой окорки обычно составляет 70–85%, а после отжима 50–60%. Устойчивое горение коры без добавки высококалорийного топлива достигается при влажности, не превышающей 60% [Головков, 1987]. Ввиду значительного разнообразия фракционного состава коры и ее исходной влажности временные параметры процесса сушки одиночных кусков коры и выхода летучих трудно предсказуемы. Поэтому для организации топочных процессов необходимы исследования динамики прогрева кусков коры при их высокоинтенсивном прогреве.

Цель исследования – изучение динамики прогрева одиночного высоковлажного куска древесной коры, находящегося в плотном слое продуваемым, высокотемпературным теплоносителем. Задачи исследования: разработка математической модели прогрева одиночного куска высоковлажной древесной коры, находящегося в плотном слое продуваемым, высокотемпературным теплоносителем; исследование закономерностей прогрева одиночного высоковлажного куска коры; получение зависимостей времени прогрева одиночного высоковлажного куска коры до температуры начала выхода летучих веществ от температуры и скорости газового потока в безразмерном виде.

Методика исследования. Прогрев одиночного куска коры на стадиях сушки и выхода летучих компонентов описывается сквозным уравнением теплопроводности с переменными граничными условиями третьего рода, учитывающими теплообмен конвекцией и тепловым излучением. Характерными параметрами процесса прогрева являются: насыпная масса, влажность материала, порозность слоя, температурный интервал нагрева материала, толщина слоя, скорость просасывания продуктов сгорания, отнесенная на свободное сечение при нормальных условиях; характерный размер куска коры, температура материала, при которой начинают выходить летучие вещества.

Для периода сушки и выхода летучих веществ система уравнений имеет вид:

уравнение теплопроводности

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

интегрируемое в области $0 \leq x \leq X$, $0 \leq \tau \leq \tau_k$;

начальное условие при $\tau = 0$:

$$T|_{\tau=0} = T^0;$$

граничные условия:

при $x = 0$:

$$-\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T - T_{\text{cp}});$$

при $x = S$:

$$-\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x} = 0,$$

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 $c_{\text{эф}}$, задаваемой выражением:

$$c_{\text{эф}} = \begin{cases} c_1(T), & T > T_k; \\ c(T_n)\psi + c(T_k)(1 - \psi) + \frac{gL}{\Delta T}, & T_n \leq T \leq T_k; \\ c_2(T), & T < T_n. \end{cases}$$

Коэффициент теплопроводности и плотность определяют по формулам:

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_1, & T > T_k; \\ \lambda_1 \psi + \lambda_2 (1 - \psi), & T_n \leq T \leq T_k; \\ \lambda_2, & T < T_n; \end{cases}$$

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

где $T_n = T_{\text{ф}} - 37$, $T_k = T_{\text{ф}} + 19,5$ – 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; $T_{\text{ф}}$ – температура фазового перехода воды.

Величина ψ определяется по формуле:

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

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_l,$$

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

Процесс термолита 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 термолита, образующихся в результате разрушения такой группы связей, описывается уравнением (из учебного пособия Померенцева В.В. и др. «Основы практической теории горения». Л., 1986 г.):

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

где V_i – доля продуктов термолита i -й группы в общем количестве продуктов термолита; τ – время разрушения связей i -й группы; c_{oi} – доля продук-

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

Константа скорости реакции, характеризующая разрушение связей в i -й группе продуктов термолiza, определяется по соотношению

$$k_i = k_{oi} \exp \left[-\frac{E_0}{RT_{\text{ч}}} \right],$$

где E_0 – энергия активации, МДж/к·моль; R – универсальная газовая постоянная; $T_{\text{ч}}$ – температура материала в узле; k_{oi} – предэкспоненциальный множитель.

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

В этом случае скорость выделения продуктов термолiza, образующихся в результате разрушения такой группы связей, описывается уравнением (из учебного пособия Любова В.К. и Любовой С.В. «Повышение эффективности энергетического использования биотоплива», 2010 г.):

$$\frac{dV}{d\tau} = k_{oi} \exp \left[-\frac{E_0}{RT_{\text{ч}}} \right] (1 - V), \quad \varepsilon \leq x \leq s. \quad (2)$$

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

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

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.

Численное решение уравнений, представленных в работах [Синицын и др., 2016, 2018], позволило установить критериальные зависимости для процесса сушки высоковлажной коры древесины. Математическое моделирование прогрева одиночного куска коры древесины в условиях плотного слоя, продуваемого высокотемпературным теплоносителем до момента времени, когда поверхность материала достигнет температуры начала выхода летучих веществ, позволило установить взаимосвязи между числами подобия и критериями подобия с учетом фазового перехода воды. Одиноч-

ный кусок коры древесины для внешней задачи приводился к одномерному телу. Температура теплоносителя на входе в плотный слой изменялась от 873 до 1273К. Скорость газового потока теплоносителя на свободное сечение принималась не более 0,6 м/с. Размер куска коры древесины менее 100 мм по длине, по ширине – 50 мм и толщине — 3...5 мм. Начальные температуры материала изменялись от 273 до 293К. Относительная влажность материала изменялась от 60 до 85%. Критерий Био $Bi = \frac{\alpha\delta}{\lambda_m} > 0,1$, т. е.

по сечению одиночной частицы имеется градиент температуры. Здесь α – коэффициент теплоотдачи; δ – полутолщина пластины или радиус эквивалентного шара; λ_m – коэффициент теплопроводности влажного материала.

В рассматриваемом диапазоне температур получены зависимости числа Рейнольдса Re от числа Коссовича Ko :

$$Re = \frac{W_{го} d_m}{\nu_t},$$

где $W_{го}$ – скорость газа на свободное сечение при нормальных условиях; d_m – диаметр куска коры эквивалентного шара, аэродинамически подобной частице коры определяется по формуле (из учебного пособия Померанцева В.В. и др. «Основы практической теории горения». Л., 1986 г.):

$$d_m = \frac{1,125}{\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c}},$$

где a, b, c – размеры куска коры в виде параллелепипеда, ν_t – коэффициент кинематической вязкости дымовых газов среднего состава.

Расчет коэффициента теплоотдачи для кусков материала, расположенных в плотном слое, выполнен с использованием формул (из учебного пособия Зобнина Б.Ф. и др. «Теплотехнические расчеты металлургических печей». М., 1975):

для $Re > 200$

$$Nu = 0,61 Re^{0,67};$$

для $Re \leq 200$

$$Nu = 0,106 Re.$$

Здесь

$$Nu = \frac{\alpha d_m}{\lambda_r},$$

где λ_r – коэффициент теплопроводности дымового газа среднего состава, α – коэффициент теплоотдачи.

Критерий подобия Коссовича

$$Ko = \frac{RG\rho_2}{c_1\rho_1(T_\Gamma - T_\Phi)}$$

показывает отношение количества теплоты, поглощенное при испарении влаги единицей объема материала, к количеству теплоты, необходимого для нагревания этой единицы объема сухого материала от температуры фазового перехода влаги до температуры теплоносителя, где $R = 2256,8$ кДж/кг – теплота испарения влаги; G – влажность материала (масса влаги в единице массы абсолютно сухого материала, кг/кг); ρ_1 и ρ_2 – плотность сухого и влажного материала; T_Γ и T_Φ – температуры теплоносителя и фазового перехода испарения влаги; c_1 и ρ_1 – удельная теплоемкость и плотность сухого материала.

Связь между Re и Ko определяется также и температурным критерием K_Γ (Лыков А.В. Учебное пособие «Теория теплопроводности». М., 1967 г.):

$$K_\Gamma = \frac{T_0 - T_\Phi}{T_\Phi - T_\Gamma},$$

где T_0 – начальная температура материала.

Температурный критерий K_Γ показывает отношение начальной температуры материала к температуре поверхности прогретого материала, если отсчет температуры ведется от температуры фазового перехода. Взаимосвязи чисел Re , K_Γ и Ko для образцов высоковлажного материала представлены на рис. 1. На основе проведенного исследования можно считать обоснованным применение формулы для расчета числа Re в плотном слое для одиночной частицы:

$$Re = A K_\Gamma^B \exp(-C K_\Gamma) Ko^m,$$

где A , B , C , m – константы.

Результаты исследования. Расчетные данные, приведенные на рис. 1, обобщены зависимостью с погрешностью не превышающей $\pm 1,83\%$:

$$Re = 6777,83 K_\Gamma^{1,79} \exp(-39,56 K_\Gamma) Ko^{1,05}.$$

Число Re в расчетах изменялось от 2,011 до 18,69, скорость газового потока $W_{го}$ изменялась от 0,1 до 0,5 м/с, температура газового потока изменялась от 600 до 1000 °С.

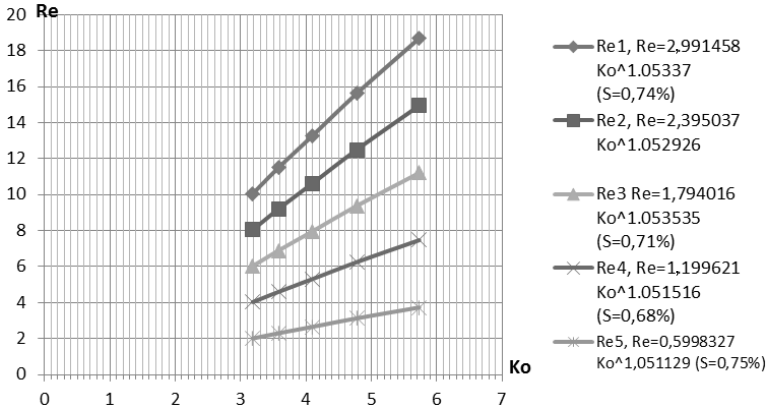


Рис. 1. Зависимость числа Re от чисел Ko и K_T

Fig. 1. The dependence of the number Re on the numbers Ko and K_T

Продолжительность прогрева материала до температуры начала выхода летучих веществ зависит от соотношения теплоты, расходуемой на испарение влаги, и теплоты, расходуемой на прогрев материала до температуры греющего теплоносителя.

Применительно к условиям исследуемого в настоящей работе процесса число Ko рассматривается как заданная величина. Для исследования зависимости $Fo = Fo(Ko)$ проведены расчетные исследования с помощью разработанной математической модели.

Взаимосвязь чисел Fo и Ko представлена на рис. 2. Расчетные данные, представленные на рис.2, получены при прогреве кусков влажной коры, расположенных на входе теплоносителя в слой, можно аппроксимировать зависимость с погрешностью не превышающей +1,53%:

$$Fo = 2,1 \cdot 10^{-3} Ko^{1,9},$$

где $Fo = \frac{a_2 \tau}{L}$ – число Фурье; $a_2 = \frac{\lambda_2}{c_2 \rho_2}$ – коэффициент температуропроводности влажного материала; λ_2 – коэффициент теплопроводности влажного материала; ρ_2 – плотность влажного материала; τ – интервал времени до начала выхода летучих веществ при температуре материала 140 °С на поверхности; L – характерный размер материала (полутолщины пластины или радиус эквивалентного шара).

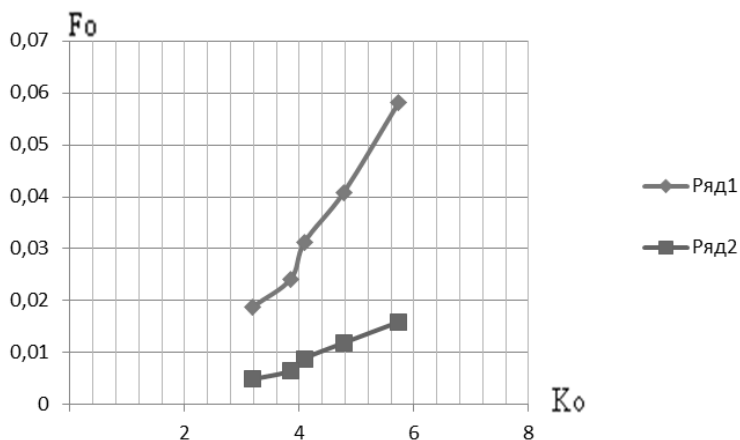


Рис. 2. Взаимосвязь между критериями F_o и K_o : ряд 1 – без учета излучающего объема; ряд 2 – с учетом излучающего объема

Fig. 2. Relationship between the criteria F_o and K_o : series 1 – without the radiating volume; series 2 – taking into account the radiating volume

Анализ полученных данных (рис. 1 и 2) показывает, что с увеличением относительной влажности материала увеличивается время прогрева до температуры начала выхода летучих. При увеличении влажности в 2 раза время прогрева увеличивается в 3 раза. Увеличение температуры теплоносителя в 2 раза снижает скорость газового потока в 5 раз при постоянном критерии K_o . Однако при этом в наружных слоях куска материала начинают выходить летучие, а во внутренних слоях материал еще не прогрелся до температуры фазового перехода. Поэтому при прогреве кусков необходимо уменьшить градиент температуры по сечению куска, уменьшая скорость теплоносителя через плотный слой и уменьшая температуру теплоносителя до температуры начала выхода летучих. Также необходимо уменьшить критерий K_r путем увеличения начальной температуры материала.

На основании проведенных исследований разработана технологическая схема энергетического исследования коры древесины в топках котлов и теплогенераторов деревообрабатывающих предприятий. Наиболее эффективной представляется двухступенчатая схема термической подготовки высоковлажной коры древесины к сжиганию в топочных устройствах. Сначала кора подсушивается отходящими дымовыми газами, а затем высокотемпературными дымовыми газами, отбираемыми из топки котла.

Выводы. Таким образом, с использованием математической модели прогрева кусков высоковлажной коры древесины проведено исследование прогрева высоковлажной древесной коры в форме параллелепипеда и эк-

вивалентного шара. Разработана методика оценки времени прогрева куска коры, находящегося в неподвижном нагреваемом плотном слое. Получены математические зависимости, позволяющие определить время прогрева кусков коры, находящихся на поверхности слоя до температуры начала выхода летучих веществ.

Библиографический список

Головков С.И., Коперин И.Ф., Найдёнов В.И. Энергетическое использование древесных отходов. М.: Лесн. пром-сть, 1987. 224 с.

Казанцев Е.Н., Казанцев Е.М. Промышленные печи: справочное рук-во для расчетов и проектирования. 2-е изд. (доп. и перераб.). М.: Metallургия, 1975. 368 с.

Любов В.К., Попова Е.И., Шкаева Н.В., Болотова К.С., Солнышкова Л.И. Исследование процесса торрефикации древесины // Вестник ЧГУ. 2017. № 3 (78). Июнь. С. 38–45.

Марьяндышев П.А., Попова Е.И., Чернов А.А., Любов В.К. Изотермическое исследование древесного топлива и его органических компонентов // Вестник ЧГУ. 2016. № 2 (71). Апрель. С. 15–18.

Синецын 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 летучих веществ в процессе нагрева древесной биомассы (коры) // Вестник ЧГУ. 2018. № 2. С. 47–53.

Синецын Н.Н., Телин Н.В., Домрачев В.А., Антонова Ю.А., Никонова Е.Л., Петрова Г.М. Исследование конвективного теплообмена при сушке коры деревьев в плотном слое // Вестник ЧГУ. 2016. № 3 (72). Июнь. С. 24–28.

Чернов А.А., Марьяндышев П.А., Любов В.К. Исследование различных видов биотоплива методом хроматографии газовых смесей // Вестник ЧГУ. 2015. № 2 (63). Март. С. 44–49.

References

Golovkov S.I., Koperin I.F., Naydyonov V.I. Energeticheskoye ispolzovaniye drevesnykh otkhodov [Utilization of wood waste for energy]. M.: Forestry, 1987. 224 s.

Kazantsev Ye.N., Kazantsev Ye.M. Promyshlennyye pechi [Industrial furnaces]. Reference guide for calculation and design. 2nd ed. (revised and enlarged). M.: Metallurgy, 1975. 368 s.

Lyubov V.K., Popova Ye. I., Shkayeva N.V., Bolotova K.S., Solnyshkova L.I. Issledovaniye protsessa torrefikatsii drevesiny [Study of the process of torrefaction of wood.]. *Cherepovets State University Bulletin*, 2017, no. 3 (78), June, pp. 38–45.

Mariandyshhev P.A., Popova Ye.I., Chernov A.A., Lyubov V.K. Izotermicheskoye issledovaniye drevesnogo topliva i ego organicheskikh komponentov [Isothermal study of wood fuel and its organic components]. *Cherepovets State University Bulletin*, 2016, no. 2 (71), April, pp. 15–18.

*Sinitsyn N.N., Telin N.V., Gryzlov V.S., Andreyev A.S., Vinogradova M.S., Garkavchenko E.V., Gnevasheva T.V., Kuznetsova V.P., Pavlova A.I. Modelirovaniye dinamiki vykhoda vlagi letuchikh veshchestv v protsesse nagreva drevesnoy biomassy (kory) [Simulation of the dynamics of volatile substances moisture yield in the process of woody biomass (bark) heating]. *Cherepovets State University Bulletin*, 2018, no. 2, pp. 47–53.*

*Sinitsyn N.N., Telin N.V., Domrachev V.A., Antonova Yu.A., Nikonova Ye.L., Petrova G.M. Issledovaniye konvektivnogo teploobmena pri sushke kory derevyev v plotnom sloye [Study of convective heat transfer when drying bark in dense layer]. *Cherepovets State University Bulletin*. 2016, no. 3 (72), June, pp. 24–28.*

*Chernov A.A., Mar'jandyshev P.A., Ljubov V.K. Issledovanie razlichnykh vidov biotopliva metodom hromatografii gazovyh smesey. *Cherepovets State University Bulletin*, 2015, no. 2 (63), Mach, pp. 44–49.*

Материал поступил в редакцию 12.10.2018 г.

Синицын Н.Н., Телин Н.В., Полеводова Л.А. Динамика прогрева одиночного высоковлажного куска древесной коры, находящегося в плотном слое, продуваемом высокотемпературным теплоносителем // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018. Вып. 225. С. 237–247. DOI: 10.21266/2079-4304.2018.225.237-247

Цель исследования – изучение динамики прогрева одиночного высоковлажного куска древесной коры, находящегося в плотном слое продуваемом высокотемпературным теплоносителем. Проведен анализ энергетического использования древесной коры в процессе ее сжигания слоевым способом в топках теплогенераторов. Выявлены условия эффективного использования древесной коры в качестве топлива. Разработана математическая модель прогрева куска высоковлажной коры древесины, находящегося в плотном слое продуваемом высокотемпературным теплоносителем. Проведено исследование динамики прогрева кусков высоковлажной древесной коры в форме параллелепипеда и эквивалентного шара. Разработана методика оценки времени прогрева куска коры, находящегося в неподвижном нагреваемом плотном слое. Численным методом получены математические зависимости, позволяющие определить время нагрева поверхностного слоя куска коры до температуры начала выхода летучих веществ. Окончательные соотношения приведены к безразмерному виду и выражены через числа Фурье и Коссовича. Полученные соотношения учитывают геометрические размеры куска коры, его исходную влажность и параметры греющего теплоносителя. Практическим приложением результатов настоящих исследований является организация топочного процесса в котельном агрегате.

Ключевые слова: сжигание топлива, сушка коры, топочные устройства.

Sinitsyn N.N., Telin N.V., Polovodova L.A. The dynamics of heating a single piece of high-moisture wood bark located in a dense layer, blown by a high-temperature coolant. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehneskoj Akademii*, 2018,

is. 225, pp. 237–247 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2018.225.237-247

The purpose of the study is to study the dynamics of heating a single piece of high – moisture tree bark located in a dense layer of blown, high-temperature coolant. The analysis of the energy use of wood bark in the process of its burning in a layered way in the furnaces of heat generators. The conditions of effective use of wood bark as fuel are revealed. A mathematical model of warming up a piece of high-moisture bark of wood located in a dense layer of blown, high-temperature coolant. The study of the dynamics of warming pieces of high-moisture tree bark in the form of a parallelepiped and an equivalent ball. The method of estimation of time of warming up of a piece of bark which is in a stationary heated dense layer is developed. The mathematical dependences allowing to determine the time of heating the surface layer of a piece of bark to the temperature of the beginning of the exit of volatile substances are obtained by numerical method. The final relations are given to a dimensionless form and expressed in terms of Fourier and Kosovic numbers. The obtained ratios take into account the geometric dimensions of the piece of bark, its initial moisture and the parameters of the heating coolant. Practical application of the results of this research is the organization of the combustion process in the boiler unit.

Key words: fuel combustion, bark drying, furnace units.

СИНИЦЫН Николай Николаевич – профессор кафедры теплоэнергетики Череповецкого государственного университета, доктор технических наук.

162600, пр. Луначарского, д. 5, г. Череповец, Россия. E-mail: sinitsyn@chsu.ru

SINITSYN Nikolay N. – DSc (Technical), Professor, Department of heat power engineering, Cherepovets State University.

162600. Lunacharskogo av. 5. Cherepovets. Russia. E-mail: sinitsyn@chsu.ru

ТЕЛИН Николай Владимирович – профессор кафедры теплоэнергетики Череповецкого государственного университета, доктор технических наук.

162600, пр. Луначарского, д. 5, г. Череповец, Россия. E-mail: telin_nv@mail.ru

TELIN Nikolay V. – DSc (Technical), Professor, Department of heat power engineering, Cherepovets State University.

162600. Lunacharskogo av. 5. Cherepovets. Russia. E-mail: telin_nv@mail.ru

ПОЛЕВОДОВА Лариса Альбертовна – доцент кафедры математики и информатики Череповецкого государственного университета, кандидат технических наук.

162600, пр. Луначарского, д. 5, г. Череповец, Россия. E-mail: lora.59@rambler.ru

POLEVODOVA Larisa A. – PhD(Technical), Associate Professor of mathematics and computer science, Cherepovets State University.

162600. Lunacharskogo av. 5. Cherepovets. Russia. E-mail: lora.59@rambler.ru