



УДК 674.047.3

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-6-159-171

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ДРЕВЕСНОЙ КОРЫ

*Н.Н. Сеницын, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [J-1662-2018](#),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8919-0573>*

*Н.В. Телин, д-р техн. наук, проф.*

Череповецкий государственный университет, просп. Луначарского, д. 5, г. Череповец, Россия, 162600; e-mail: nnsinitcyn@chsu.ru, telin\_nv@mail.ru

В настоящее время на лесоперерабатывающих предприятиях Российской Федерации образуется большое количество отходов в виде древесной коры, которые не находят широкого применения в промышленности и оказывают отрицательное воздействие на окружающую среду. Одним из возможных направлений переработки таких отходов является их сжигание в слоевых топках. Однако древесная кора ввиду своей высокой влажности и крайне разнородного фракционного состава относится к низкокалорийному трудносжигаемому виду топлива. Высокая влажность уменьшает энергетическую плотность древесной коры. Крайне разнородный ее фракционный состав (линейные размеры отдельных кусков коры могут изменяться от миллиметров до десятков сантиметров) осложняет организацию топочного процесса. Эффективная утилизация древесной коры обеспечивается при ее предварительной сушке до влажности 55...60 % и размере кусков коры, не превышающем 100 мм. Целью представленной работы является исследование температурного поля в плотном продуваемом слое высоковлажной древесной коры при ее сушке высокотемпературными дымовыми газами котельных агрегатов. На основе анализа физической картины разработана математическая модель прогрева плотного слоя высоковлажной древесной коры с учетом оценки толщины плотного слоя коры, использующая методику расчета аэродинамического сопротивления поперечно продуваемого слоя потоку газов. Проведены численные эксперименты по расчету полей температур при прогреве одиночного куска высоковлажной древесной коры, расположенного в передней части плотного продуваемого слоя. Результаты расчета сравнивались с результатами, полученными по разработанной нами модели. На основе математического моделирования процесса прогрева плотного слоя и термической подготовки высоковлажной древесной коры к сжиганию разработана методика, позволяющая рассчитать общую продолжительность нагрева влажного материала до полного высыхания слоя, время, затраченное на прогрев продуваемого плотного слоя до полного выхода летучих веществ, а также температурные поля в слое коры и потоке газа. Предложены схема подготовки высоковлажной коры к сжиганию и методика для определения характерных параметров двухступенчатой схемы энергетического использования высоковлажной древесной коры в слоевых топках котлов и теплогенераторов.

*Для цитирования:* Сеницын Н.Н., Телин Н.В. Математическое моделирование процесса сушки древесной коры // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 6. С. 159–171. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-6-159-171

*Ключевые слова:* сушка, высоковлажная древесная кора, топочные устройства, математическая модель прогрева плотного продуваемого слоя, продуваемый плотный слой, температурное поле продуваемого плотного слоя, фазовый переход влаги.

### Введение

На современных деревообрабатывающих предприятиях древесная кора представляет собой непригодные для технологического применения отходы. Наиболее перспективным направлением утилизации древесной коры является использование ее в качестве возобновляемого топлива для котлов и теплогенераторов лесоперерабатывающих предприятий. Однако древесная кора ввиду своей высокой влажности и крайне разнородного фракционного состава относится к низкокалорийному трудносжигаемому виду топлива. Высокая влажность уменьшает энергетическую плотность древесной коры. Крайне разнородный фракционный состав коры (линейные размеры отдельных кусков коры могут изменяться от миллиметров до десятков сантиметров) осложняет организацию топочного процесса [3, 7, 9, 12–15, 17–20, 22–26, 28, 30–33].

Для утилизации древесной коры в условиях лесопромышленных предприятий наиболее приемлемы топки, использующие слоевой способ сжигания. Эффективная утилизация коры обеспечивается при ее предварительной сушке до влажности 55...60 % и размере кусков коры, не превышающем 100 мм [3, 7, 19, 21, 22].

Целью представленной работы является исследование температурного поля в плотном продуваемом слое высоковлажной древесной коры при ее сушке высокотемпературными дымовыми газами котельных агрегатов.

### Объекты и методы исследования

Топки с зажатым продуваемым плотным слоем, применяемые для сжигания древесной коры, значительно расширяют диапазон допустимого форсирования процесса горения топлива в слое, увеличивают теплонапряжение зеркала горения. Сначала древесная кора по топливному рукаву каскадно-лоткового типа плавных очертаний под собственным весом поступает в предтопок.

Верхняя часть предтопка отличается наличием «жалюзи», выполненных из чугунных или стальных колосников. Моделирование процесса прогрева материалов в плотном слое рассматривается в работах [4, 5, 8, 16, 27, 29].

Слой древесной коры толщиной  $h$  продувается дымовыми газами со скоростью на свободное сечение  $\omega_{r0}$ , начальная температура газов –  $t'_r$ , температура слоя коры в начальный момент времени –  $t'_m$ .

Для расчета температурного поля в слое древесной коры применяются решения Шумана и Анцелиуса [6, 10]:

$$Q_m = \frac{t_m - t'_m}{t'_r - t'_m} = e^{-Y} \int_0^Z e^{-\varepsilon} I_0(2\sqrt{Y\varepsilon}) d\varepsilon; \quad (1)$$

$$Q_r = \frac{t'_r - t'_m}{t'_r - t'_m} = 1 - e^{-Z} \int_0^Y e^{-\varepsilon} I_0(2\sqrt{Z\varepsilon}) d\varepsilon, \quad (2)$$

где  $t_m$ ,  $t_r$  – температура древесной коры и дымового газа соответственно, °С;  $Y$  – безразмерная высота слоя коры,  $Y = k_v h / (C_r \omega_{r0})$ ;  $k_v$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>3</sup>·К);  $C_r$  – объемная теплоемкость газа, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $Z$  – безразмерное время,  $Z = k_v \tau / (C_m(1 - f))$ ;  $\tau$  – время;  $C_m$  – кажущаяся теплоемкость материала коры с учетом теплоты на испарение влаги, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $f$  – пороз-

ность плотного слоя древесной коры,  $f = 1 - \rho_{\text{нас}}/\rho_m$ ;  $\rho_{\text{нас}}$  – насыпная плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_m$  – плотность влажного материала, кг/м<sup>3</sup>;  $I_0$  – функция Бесселя от мнимого аргумента первого рода нулевого порядка;  $\varepsilon$  – переменная интегрирования.

Коэффициент теплопередачи находится по соотношению

$$k_v = \left( \frac{d_m^2}{A(1-f)\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_v} \right)^{-1},$$

где  $d_m$  – определяющий средний диаметр кусков коры (представленных в форме шара);  $A$  – числовой коэффициент для кусков коры произвольной формы,  $A = 75$ ;  $\lambda_m$  – коэффициент теплопроводности материала коры, Вт/(м·К);  $\alpha_v$  – объемный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>3</sup>·К).

Связь объемного коэффициента теплоотдачи с обычным коэффициентом теплоотдачи  $\alpha_F$ :

$$\alpha_v = \alpha_F F.$$

Для кусков коры сферической формы, имеющих диаметр  $d_m$ :

$$F = 6,0(1-f) / d_m, \text{ м}^2/\text{м}^3,$$

а для кусков неправильной формы:

$$F = 7,5(1-f) / d_m, \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

Для кусков древесной коры правильной сферической (или близкой к ней) формы расчет коэффициентов теплоотдачи может быть выполнен с применением соотношений [5, 10]:

$$\text{Nu} = 0,61\text{Re}^{0,67} \quad (\text{для } \text{Re} > 200);$$

$$\text{Nu} = 0,106\text{Re} \quad (\text{для } \text{Re} \leq 200),$$

где  $\text{Nu} = \alpha_F d_m / \lambda_g$ ;  $\lambda_g$  – коэффициент теплопроводности газа;  $\text{Re} = \omega_{g0} d_m / \nu_g$ ;  $\nu_g$  – коэффициент кинематической вязкости газа.

Физические свойства газа выбираются для средней температуры системы «древесная кора – газ».

Время сушки слоя древесной коры ( $\tau_c$ ) высокотемпературными продуктами сгорания для известной толщины слоя и заданной конечной температуры нагрева определяется соотношением:

$$\tau_c = Z C_m \frac{1-f}{k_v}.$$

Чтобы получить представление об изменении температуры газа во времени в месте выхода его из слоя, необходимо задать несколько значений промежутков времени прогрева слоя и определить соответствующие значения чисел  $Z$ . С помощью этих данных для  $Y = \text{const}$  находим значение  $Q_m$  по формуле (1). Затем, зная температуру газа на входе в слой и начальную температуру материала, рассчитаем температуру газа на выходе из слоя в различные последовательные промежутки времени. Задав  $Z$  и меняя  $Y$  от 0 до  $Y = \text{const}$ , получаем распределение температур по высоте слоя в данный момент времени.

Для оценки толщины  $h_m$  плотного слоя коры используется методика расчета аэродинамического сопротивления поперечно продуваемого слоя потоку газов, определяемого по формуле [2]:

$$\Delta h_m = \xi_{\text{сл}} \frac{\omega_{\text{г0}}^2}{2} \rho, \quad (3)$$

где  $\xi_{\text{сл}}$  – коэффициент сопротивления слоя;  $\rho$  – плотность текущей среды, кг/м<sup>3</sup>.

Коэффициент сопротивления слоя определяется по формуле

$$\xi_{\text{сл}} = \xi_0 \Delta h \frac{a}{f}, \quad (4)$$

где  $\xi_0 = \frac{36,3}{\text{Re}_a} + 0,4$ ; число Рейнольдса  $\text{Re}_a = 4\omega_{\text{г0}} / (v, a)$ ;  $a = 6 / d_m (1 - f)$  – удельная поверхность нагрева (на единицу объема), м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>.

На основе данной модели (1)–(4) и модели прогрева (5)–(7) высоковлажной древесной коры проводились численные эксперименты. Результаты расчета полей температур при прогреве одиночного куска древесной коры, расположенного в передней части плотного слоя, по данной модели сравнивались с результатами, полученными по модели, представленной в работе [11].

Процесс прогрева высоковлажной древесной коры описывается уравнениями [11]:

уравнение теплопроводности:

$$c_{\text{эф}}(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad 0 \leq x \leq S, 0 \leq \tau \leq \tau_k; \quad (5)$$

начальное условие:

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

граничные условия:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha(T - T_{\text{сп}});$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=S} = 0,$$

где  $\rho$  – плотность материала коры;  $\lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности материала древесной коры;  $S$  – половина толщины куска древесной коры;  $T^0$  – начальная температура древесной коры;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $T_{\text{сп}}$  – температура среды.

Выделение теплоты фазового перехода в уравнении (5) учитывается с помощью эффективной теплоемкости  $c_{\text{эф}}$ :

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

где  $c(T)$  – теплоемкость;  $c_1$  и  $c_2$  – теплоемкость сухого и влажного слоев материала древесной коры;  $\psi$  – доля влажного материала древесной коры;  $g$  – доля влаги в элементарном объеме материала древесной коры;  $L$  – удельная теплота фазового перехода влаги.

Коэффициент теплопроводности и плотность коры определяются по соотношениям:

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_1(T), & T > T_k; \\ \lambda_1(T)\psi + \lambda_2(T_2)(1-\psi), & T_n \leq T \leq T_k; \\ \lambda_2(T), & T < T_n; \end{cases}$$

$$\rho = \begin{cases} \rho_1(T), & T > T_k; \\ \rho_1(T)\psi + \rho_2(T_2)(1-\psi), & T_n \leq T \leq T_k; \\ \rho_2(T), & T < T_n, \end{cases}$$

где  $T_n, T_k$  – фиктивные температуры начала и окончания фазового перехода воды,  $T_n = T_\phi - 37,0$ ;  $T_k = T_\phi + 19,5$ ;  $T_\phi$  – температура фазового перехода воды;

$\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – коэффициент теплопроводности сухого и влажного слоев материала древесной коры;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотность сухого и влажного слоев материала древесной коры.

Величина  $\psi$  определяется следующим образом:

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

Коэффициент теплоотдачи

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

где  $\alpha_k$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией;  $\alpha_l$  – коэффициент теплоотдачи излучением.

Скорость выделения продуктов термоллиза описывается уравнением [11]:

$$\frac{dV}{d\tau} = k(1-V),$$

где  $V$  – доля продуктов термоллиза в общем количестве продуктов термоллиза;  $\tau$  – время.

Константа скорости реакции, характеризующая разрыв физико-химических связей, определяется по соотношению

$$k = k_0 \exp\left[-\frac{E_0}{RT_c}\right],$$

где  $k_0$  – предэкспоненциальный множитель;  $E_0$  – энергия активации, МДж/кмоль;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T_c$  – температура материала;

Максимальный выход летучих веществ в расчете на сухую массу древесной коры при проведении расчетов составлял  $V_{\max}^c = 83,6$  %,  $E_0 = 59$  МДж/кмоль,  $k_0 = 38,3$  с<sup>-1</sup>.

В этом случае скорость выделения продуктов термоллиза описывается уравнением [11]:

$$\frac{dV}{d\tau} = k_0 \exp\left[-\frac{E_0}{RT_q}\right](1-v), \varepsilon \leq x \leq S. \quad (6)$$

Изменение массы древесной коры в течение прогрева за счет выхода влаги и летучих веществ определяется соотношением

$$\frac{dm_q}{d\tau} = \frac{dW}{d\tau} + \frac{dY}{d\tau}. \quad (7)$$

Система уравнений (5)–(7) решена численным методом. Решение уравнения (5) получено методом конечных разностей по явной схеме аппроксимации производных. Уравнения (6) и (7) решены методом Рунге–Кутты четвертого порядка.

Для определения коэффициента теплопередачи между высоковлажным куском древесной коры и высокотемпературным газовым потоком в условиях вынужденной конвекции ( $Re = 1 \dots 200$ ) используется формула [13]:

$$Nu = \frac{\alpha d_m}{\lambda} = Nu_0 + 1,07Re^{0,48}Pr^{0,33}Gu^{0,175},$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности газа при средней температуре между поверхностью куска коры и газом, Вт/(м·К);  $Nu_0$  – критерий Нуссельта при  $Re = 0$ ,  $Nu_0 = 2$  (для значений  $Nu > 80$  величиной  $Nu_0$  можно пренебречь);  $Re$  – критерий Рейнольдса,  $Re = (\omega_{t0} d_m) / \nu_t$ ;  $\nu_t$  – коэффициент кинематической вязкости газа, м<sup>2</sup>/с;  $Pr$  – критерий Прандтля для газа.

Влияние массообмена на теплообмен учитывается критерием Гухмана:

$$Gu = (T_c - T_n) / T_c,$$

где  $T_c$  и  $T_n$  – температуры газа и поверхности материала, К.

Эффективный диаметр куска древесной коры, представленного в форме шара, определяется по формуле [10]:

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

где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости дымовых газов среднего состава,  $\nu = 1,125$ ;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – длина, ширина и толщина куска коры, имеющего форму параллелепипеда.

После достижения поверхностью материала древесной коры сухого состояния расчет коэффициента теплоотдачи проводится по формуле [1]:

$$Nu = 2 + 0,03Re^{0,54}Pr^{0,33} + 0,35Re^{0,58}Pr^{0,36},$$

где  $Re < 3 \cdot 10^5$ ;  $0,6 < Pr < 8000$ .

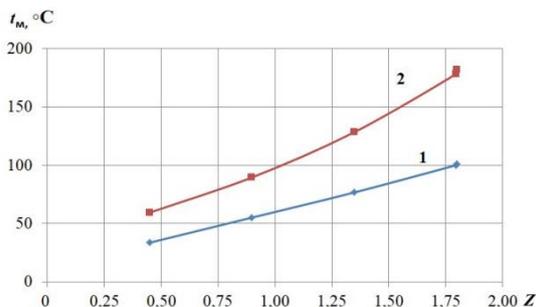
#### Результаты исследования и их обсуждение

Математическое моделирование прогрева отдельного куска древесной коры, находящегося на входе в слой греющих газов, хорошо согласуется с результатами, полученными с использованием решений Шумана и Анцелиуса. Сравнение результатов расчета прогрева высоковлажной одиночной частицы куска древесной коры по модели (1)–(4) и модели (5)–(7) показывает, что кусочки, расположенные в передней части продуваемого слоя прогреваются примерно одинаково. Время прогрева частицы древесной коры по модели (1)–(4) составляет 21,59 с, а по модели (5)–(7) – 26,00 с. Относительная погрешность 16,96 %. Оценку температурного поля по толщине слоя коры и газа можно проводить по модели (1)–(4).

На рис. 1 представлено изменение температур газа и прогреваемого материала в месте выхода газа из слоя. С увеличением продолжительности нагрева слоя температура материала и газа растет. Средняя температура газа остается не очень большой от момента начала прогрева слоя и до момента, когда материал полностью высушен.

Рис. 1. Изменение температур высушиваемого материала (1) и газа (2) в месте выхода газа из слоя

Fig. 1. Changes in the dryable material (1) and gas (2) temperatures at the point of gas emission from the layer



На рис. 2 представлено распределение температур прогреваемого слоя материала и греющего газа. К моменту высыхания высоковлажной древесной коры на выходе газа из слоя температура материала на входе в слой очень высокая. При этом превышена температура начала выхода летучих веществ, а также температура максимальной скорости реакции горения кокса. Эта температура выше диапазона температур интенсивного выхода летучих веществ.

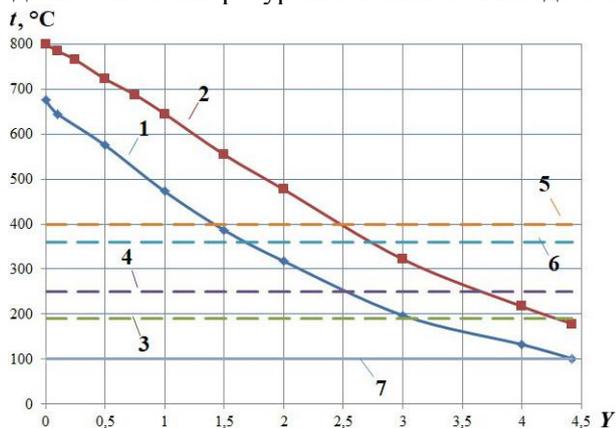


Рис. 2. Распределение температур по высоте слоя ( $Z = 1,798$ ): 1 – температура коры; 2 – температура газа; 3 – температура начала выхода летучих веществ ( $t_{в,л} = 190$  °C); 4 – нижняя граница температурного диапазона интенсивного выхода летучих веществ ( $t = 250$  °C); 5 – верхняя граница температурного диапазона интенсивного выхода летучих веществ ( $t = 400$  °C); 6 – температура максимальной скорости реакции горения летучих веществ ( $t = 360$  °C); 7 – температура фазового перехода влаги ( $T_{\phi} = 100$  °C)

Fig. 2. Distribution of the temperatures along the layer height ( $Z = 1,798$ ): 1 – bark temperature; 2 – gas temperature; 3 – onset temperature of devolatilization ( $t_{в,л} = 190$  °C); 4 – the lower limit of the temperature range of intensive devolatilization ( $t = 250$  °C); 5 – the upper limit of the temperature range of intensive devolatilization ( $t = 400$  °C); 6 – temperature of the maximum reaction rate of the volatile substances combustion ( $t = 360$  °C); 7 – phase transition temperature of moisture ( $T_{\phi} = 100$  °C)

На выходе из слоя теплоноситель будет содержать летучие вещества, т. е. газообразные горючие элементы. Таким образом, при сушке высоковлажной древесной коры в плотном продуваемом слое высокотемпературным газовым теплоносителем возможно содержание горючих элементов в газе на выходе из слоя.

На рис. 3 представлено распределение температур прогреваемого материала и газа по высоте слоя в направлении движения греющего газа. При этом температура газа не превышает температуру начала выхода летучих веществ из высоковлажной древесной коры. Продолжительность обработки нагреваемого материала – до момента выхода всей влаги. Безразмерное время увеличивается до значения  $Z = 9,800$ . При сушке высокотемпературным теплоносителем  $Z = 1,798$  при таких же условиях исходного материала на входе в слой и на выходе из него.

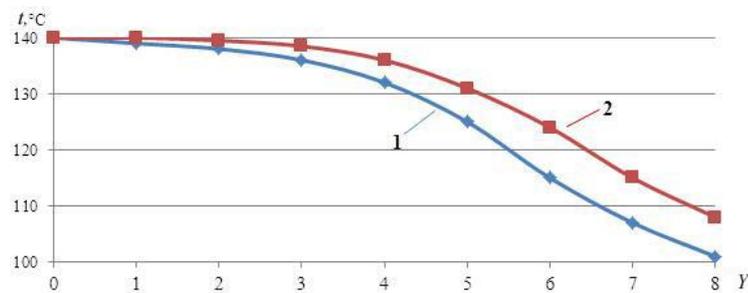


Рис. 3. Изменение температур сушильного агента и высушиваемого материала по толщине слоя коры ( $T_r = 140$  °C):  
1 – температура коры; 2 – температура газа

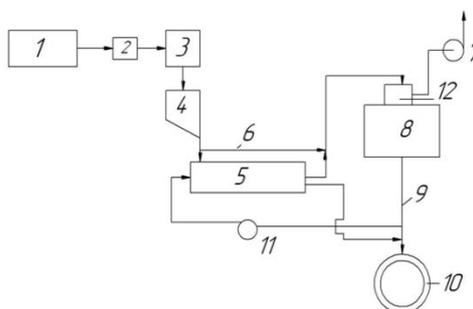
Fig. 3. Change in the temperatures of the drying agent and the material being dried over the bark layer thickness ( $T_r = 140$  °C):  
1 – bark temperature; 2 – gas temperature

Анализ полученных данных (см. рис. 1–2) показывает, что с увеличением температуры греющего теплоносителя снижается продолжительность прогрева слоя кусковых материалов. При повышении температуры теплоносителя в 5,7 раза продолжительность прогрева уменьшается в 5,45 раза при одних и тех же условиях для материала (влажность, характерный размер). При этом в слоях кускового материала, расположенных на входе греющего теплоносителя, начинают интенсивно выходить летучие вещества, а на выходе греющего теплоносителя из слоя материал полностью высушен.

На основании проведенных исследований разработана технологическая схема энергетического использования древесной коры в слоевых топках котлов и теплогенераторов деревообрабатывающих предприятий. Для утилизации высоковлажной древесной коры наиболее эффективной представляется двухступенчатая схема ее термической подготовки к сжиганию в топочных устройствах, обеспечивающая предварительную подсушку высоковлажной коры непосредственно перед сжиганием. На рис. 4 представлена теплотехническая схема сжигания древесной коры.

Рис. 4. Теплотехническая схема сжигания древесной коры: 1 – окорочный цех; 2 – магнитный сепаратор; 3 – корорубка; 4 – бункерное устройство; 5 – сушильная установка; 6 – конвейер; 7 – вентилятор; 8 – котельная; 9 – боров; 10 – дымовая труба; 11 – дымосос; 12 – сушилка

Fig. 4. Heat engineering diagram of wood bark combustion: 1 – debarking shop; 2 – magnetic separator; 3 – bark chopper; 4 – barker; 5 – drying unit; 6 – conveyor; 7 – fan; 8 – boiler room; 9 – chimney intake; 10 – chimney; 11 – smoke exhauster; 12 – dryer



Кора из окорочного цеха проходит магнитный сепаратор. После извлечения металлических частиц она поступает в корорубку. Измельченная сырая кора направляется в бункерное устройство для накопления и буферного хранения сырой коры. Из бункерного устройства кора транспортируется в сушильную установку. В конвейерной сушилке она подсушивается дымовыми газами, подаваемыми из борова котельной дымососом.

Подсушенная кора из сушилки подается конвейерной лентой в топку котельной для сжигания. В топке она под действием собственного веса поступает в предтопок. Дымовые газы из топочной камеры пронизывают зажатый слой в верхней его части. Сушильный агент (5...10 %) вентилятором выбрасывается в окружающую среду. Отработавшие газы выбрасываются в атмосферу через дымовую трубу. Если сушильная установка не работает, то кора подается конвейерной лентой в сушилку.

Кора перед подачей ее в топочное устройство подсушивается отходящими дымовыми газами в сушильной установке, а затем в сушилке, совмещенной с топкой котла, она прогревается до температуры начала выхода летучих веществ высокотемпературными дымовыми газами, забираемыми из топки котла. Сушка коры непосредственно перед ее сжиганием теплотехнически обоснована в том случае, если процесс осуществляется за счет вторичных тепловых ресурсов: тепла дымовых газов котельных и электростанций, тепла воздуха, выбрасываемого при вентиляции помещений и т. п.

#### Выводы

1. Проведено исследование прогрева плотного слоя высоковлажной древесной коры, продуваемого высокотемпературным и низкотемпературным теплоносителями.

2. Разработана методика оценки продолжительности прогрева продуваемого плотного слоя высоковлажной древесной коры.

3. Полученные результаты расчета температурных полей газа и материала высоковлажной древесной коры в продуваемом плотном слое позволяют организовать топочные процессы с учетом времени прогрева кусков коры, находящихся на поверхности слоя, на входе и выходе греющего газа – с учетом выхода летучих веществ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Аметистов Е.В., Григорьев В.А., Емцев Б.Т. и др. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: справочник / под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. М.: Энергоиздат, 1982. 512 с. [Ametistov E.V., Grigor'ev V.A., Emtsev B.T. et al. *Heat and Mass Transfer. Heat Engineering Experiment: A Handbook*. Ed. by V.A. Grigor'ev, V.M. Zorin. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 512 p.].
2. Аэродинамический расчет котельных установок (нормативный метод) / под ред. С.И. Мочана. Изд. 3-е. Л.: Энергия, 1977. 256 с. [*Aerodynamic Analysis of Boiler Plants (Normative Method)*]. Ed. by S.I. Mochan. Leningrad, Energiya Publ., 1977. 256 p.].
3. Головкин С.И., Коперин И.Ф., Найденов В.И. Энергетическое использование древесных отходов. М.: Лесн. пром-сть, 1987. 224 с. [Golovkin S.I., Koperin I.F., Naidenov V.I. *Energy Use of Wood Waste*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1987. 224 p.].
4. Дорняк О.Р. Математическое моделирование процесса сушки древесины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2012. № 5. С. 100–107. [Dornyak O.R. Mathematical Modelling of Wood Drying Process. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2012, no. 5, pp. 100–107]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/047/%D0%9C%D0%A2%D0%941.pdf>
5. Ермоченков М.Г. Кинетические параметры процесса сушки древесины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 6. С. 114–125. [Ermochenkova M.G. Kinetic Parameters of Wood Drying Process. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 6, pp. 114–125]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2017.6.114](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.6.114), URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/443/3Ermochenkova.pdf>
6. Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Металлургия, 1975. 368 с. [Kazantsev E.I. *Industrial Furnaces. Reference Manual for Calculations and Design*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975. 368 p.].
7. Любов В.К., Попов А.Н., Попова Е.И., Малыгин П.В., Солнышкова Л.М. Исследование эффективности сжигания древесного биотоплива в теплогенерирующей установке // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 4. С. 149–161. [Lyubov V.K., Popov A.N., Popova E.I., Malygin P.V., Solnyshkova L.M. Wood-Based Biofuel Efficiency in the Heat Producing Installation. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 4, pp. 149–161]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2017.4.149](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.4.149), URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/5e9/3lyubov.pdf>
8. Любов В.К., Попова Е.И., Шкаева Н.В., Болотова К.С., Солнышкова Л.И. Исследование процесса торрефикации древесины // Вестн. ЧГУ. 2017. № 3(78). С. 38–45. [Lyubov V.K., Popova E.I., Shkaeva N.V., Bolotova K.S., Solnyshkova L.I. A Study of Wood Torrefaction. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Cherepovets State University Bulletin], 2017, no. 3(78), pp. 38–45]. DOI: [10.23859/1994-0637-2017-3-78-4](https://doi.org/10.23859/1994-0637-2017-3-78-4)
9. Максимук Ю.В., Пономарев Д.А., Курсевич В.Н., Фесько В.В. Теплота сгорания древесного топлива // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 4. С. 116–129. [Maksimuk Yu.V., Ponomarev D.A., Kursevich V.N., Fes'ko V.V. Calorific Value of Wood Fuel. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 4, pp. 116–129]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2017.4.116](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.4.116), URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/6a0/1maksimchuk.pdf>
10. Синицын Н.Н., Телин Н.В., Домрачев Д.А., Антонова Ю.А., Никонова Е.Л., Петрова Г.М. Исследование конвективного теплообмена при сушке коры деревьев в плотном слое // Вестн. ЧГУ. 2016. № 3(72). С. 24–28. [Sinityn N.N., Telin N.V., Domrachev D.A., Antonova Y.A., Nikonova E.L., Petrova G.M. The Study of Convective Heat Transfer during Drying in a Dense Layer of Tree Bark. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Cherepovets State University Bulletin], 2016, no. 3(72), pp. 24–28].

11. 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 (кору) // Вестн. ЧГУ. 2018. № 2(83). С. 47–53. [Sinityn N.N., Telin N.V., Gryzlov V.S., Andreev A.S., Vinogradova M.S., Garkavchenko E.V., Gnevasheva 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. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Cherepovets State University Bulletin], 2018, no. 2(83), pp. 47–53]. DOI: [10.23859/1994-0637-2018-1-83-6](https://doi.org/10.23859/1994-0637-2018-1-83-6)
12. Степанов В.С., Степанова Т.Б., Старикова Н.В. Оценка теплотехнических характеристик древесного топлива // Системы. Методы. Технологии. 2015. № 1(25). С. 117–123. [Stepanov V.S., Stepanova T.B., Starikova N.V. Evaluating Burning Characteristics of Wood Fuels. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2015, no. 1(25), pp. 117–123].
13. Фролов В.Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов. Л.: Химия, 1987. 208 с. [Frolov V.F. *Modeling the Drying of Dispersed Materials*. Leningrad, Khimiya Publ., 1987. 208 p.].
14. Чернов А.А., Марьяндышев П.А., Любов В.К. Исследование различных видов биотоплива методом хроматографии газовых смесей // Вестн. ЧГУ. 2015. № 2(63). С. 44–49. [Chernov A.A., Maryandyshov P.A., Lyubov V.K. Studying the Different Kinds of Biofuels Using the Gas Chromatography of Gaseous Mixtures. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Cherepovets State University Bulletin], 2015, no. 2(63), pp. 44–49].
15. Bioenergy. Ch. 7. *World Energy Resources: 2013 Survey*. London, World Energy Council, 2013. 24 p. Available at: [https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2013/10/WER\\_20137Bioenergy.pdf](https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2013/10/WER_20137Bioenergy.pdf) (accessed 27.12.18).
16. Bobkov V.I., Borisov V.V., Dli M.I., Meshalkin V.P. Intensive Technologies for Drying a Lump Material in a Dense Bed. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2017, vol. 51, iss. 1, pp. 70–75. DOI: [10.1134/S0040579517010031](https://doi.org/10.1134/S0040579517010031)
17. Dahlen J., Prewitt L., Shmulsky R., Jones D. Hazardous Air Pollutants and Volatile Organic Compounds Emitted during Kiln Drying of Southern Pine Lumber to Interior and Export Moisture Specifications. *Forest Products Journal*, 2011, vol. 61, iss. 3, pp. 229–234. DOI: [10.13073/0015-7473-61.3.229](https://doi.org/10.13073/0015-7473-61.3.229)
18. Di Blasi C. Heat, Momentum and Mass Transport through a Shrinking Biomass Particle Exposed to Thermal Radiation. *Chemical Engineering Science*, 1996, vol. 51, iss. 7, pp. 1121–1132. DOI: [10.1016/S0009-2509\(96\)80011-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(96)80011-X)
19. Flach B., Bendz K., Krautgartner R., Lieberz S. *EU-27. Biofuels Annual. EU Biofuels Annual 2013*. Report No. NL3034. The Hague, USDA Foreign Agricultural Service, 2013. 34 p.
20. Howard J.B., Essenhing R.H. Pyrolysis of Coal Particles in Pulverized Fuel Flames. *Industrial and Engineering Chemistry, Process Design and Development*, 1967, vol. 6, no. 1, pp. 74–84. DOI: [10.1021/i260021a013](https://doi.org/10.1021/i260021a013)
21. Lubov V.K., Diachkov V.A. Methodical Aspects of Energy Audit. *International Conference. Forest Sector Development Problems. Extended Abstracts*. Petrozavodsk, 1998, pp. 26–27.
22. Lubov V.K., Diachkov V.A., Lubova O.A. Some Problems of Small Energetics and Ways of Their Solution. *International Conference. Forest Sector Development Problems. Extended Abstracts*. Petrozavodsk, 1998, pp. 25–26.
23. *Lumber Drying Sourcebook: 40 Years of Practical Experience*. Ed. by E.M. Wengert, R.L. Toennisson. Madison, WI, Forest Products Society, 1998. 371 p.
24. Magdziarz A., Wilk M., Straka R. Combustion Process of Torrefied Wood Biomass. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2017, vol. 127, pp. 1339–1349. DOI: [10.1007/s10973-016-5731-0](https://doi.org/10.1007/s10973-016-5731-0)

25. Maryandyshev P.A., Chernov A.A., Popova E.I., Lyubov V.K. Thermal Decomposition and Combustion of Coals, Fuel Wood, and Hydrolytic Lignin, as Studied by Thermal Analysis. *Solid Fuel Chemistry*, 2016, vol. 50, iss. 3, pp. 167–176. DOI: [10.3103/S0361521916030095](https://doi.org/10.3103/S0361521916030095)
26. Maryandyshev P.A., Chernov A.A., Popova E.I., Eseev M.K., Lyubov V.K. The Isothermal Degradation of Wood. *Solid Fuel Chemistry*, 2016, vol. 50, iss. 6, pp. 381–389. DOI: [10.3103/S0361521916060069](https://doi.org/10.3103/S0361521916060069)
27. Maryandyshev P.A., Popova E.I., Chernov A.A., Eseev M.K., Lyubov V.K. Isothermal and Morphological Studies of the Torrefaction of Spruce Wood. *Solid Fuel Chemistry*, 2018, vol. 52, iss. 3, pp. 153–162. DOI: [10.3103/S0361521918030072](https://doi.org/10.3103/S0361521918030072)
28. Maryandyshev P.A., Popova E.I., Chernov A.A., Popov M.S., Lyubov V.K., Trouve G. et al. Thermal Decomposition and Combustion of Biofuels. *Solid Fuel Chemistry*, 2017, vol. 51, iss. 6, pp. 370–378. DOI: [10.3103/S0361521917060052](https://doi.org/10.3103/S0361521917060052)
29. Peters B., Bruch C. Drying and Pyrolysis of Wood Particles: Experiments and Simulation. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2003, vol. 70, iss. 2, pp. 233–250. DOI: [10.1016/S0165-2370\(02\)00134-1](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(02)00134-1)
30. Poletto M., Zattera A.J., Forte M.M.C., Santana R.M.C. Thermal Decomposition of Wood: Influence of Wood Components and Cellulose Crystallite Size. *Bioresource Technology*, 2012, vol. 109, pp. 148–153. DOI: [10.1016/j.biortech.2011.11.122](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.122)
31. Reid A.M., Robertson K.M. Energy content of common fuels in Upland Pine Savannas of the South-Eastern US and Their Application to Fire Behaviour Modelling. *International Journal of Wildland Fire*, 2012, vol. 21(5), pp. 591–595. DOI: [10.1071/WF10139](https://doi.org/10.1071/WF10139)
32. Telmo C., Lousada J. Heating Values of Wood Pellets from Different Species. *Biomass and Bioenergy*, 2011, vol. 35(7), pp. 2634–2639.
33. Zeng W., Tang S., Xiao Q. Calorific Values and Ash Contents of Different Parts of Masson Pine Trees in Southern China. *Journal of Forestry Research*, 2014, vol. 25, iss. 4, pp. 779–786. DOI: [10.1007/s11676-014-0525-3](https://doi.org/10.1007/s11676-014-0525-3)

## MATHEMATICAL MODELING OF THE BARK DRYING PROCESS

*N.N. Sinitsyn, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [J-1662-2018](https://orcid.org/0000-0001-8919-0573),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8919-0573>*

*N.V. Telin, Doctor of Engineering, Prof.*

Cherepovets State University, prosp. Lunacharskogo, 5, Cherepovets, 162600, Russian Federation; e-mail: [nnsinitcyn@chsu.ru](mailto:nnsinitcyn@chsu.ru), [telin\\_nv@mail.ru](mailto:telin_nv@mail.ru)

Currently, a large amount of wood bark waste is generated at the timber processing enterprises of the Russian Federation, which is not widely used in industry and has a negative impact on the environment. One of the feasible directions for the processing of such waste is its burning in layered furnaces. However, tree bark, due to its high moisture content and extremely heterogeneous fractional composition, belongs to a low-energy, difficult-to-burn fuel. High humidity reduces the energy density of the bark. The extremely heterogeneous fractional composition of tree bark (linear dimensions of random bark chips can vary from millimeters to tens of centimeters) complicates the organization of the burning process. Effective utilization of tree bark is ensured when it is pre-dried to a moisture content of 55–60 % and the size of bark chips not exceeding 100 mm. The purpose of the presented work is to study the temperature field in a dense blown layer of high-moisture bark when drying it with high-temperature flue gases from boiler units. A mathematical model for heating the dense layer of high moisture tree bark has been developed based on the physics analysis. It was done taking into account the assessment of the bark dense layer thickness, which uses the method of calculating the aerodynamic resistance of a transversely blown layer to a gas flow. Numerical experiments were carried out in order to calculate the temperature fields during the heating of a single chip of high moisture tree bark located in the front part of the

---

dense blown layer. The calculation data were compared with the results obtained using the developed model. A procedure that allows calculating the total duration of heating the wet material until the layer is completely dry, the time spent on heating the blown dense layer until the complete release of volatile substances, and the temperature fields in the bark layer and gas flow has been developed on the basis of mathematical modeling of the process of the dense layer heating and thermal preparation of high moisture tree bark for burning. A scheme for preparing high moisture tree bark for burning and a method for determining the characteristic parameters of a two-stage scheme of energy use of high moisture tree bark in layered furnaces of boilers and heat generators are proposed.

**For citation:** Sinitsyn N.N., Telin N.V. Mathematical Modeling of the Bark Drying Process. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 6, pp. 159–171. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-6-159-171

**Keywords:** drying, high moisture bark, furnace devices, mathematical model of heating a blown dense layer, blown dense layer, temperature field of a blown dense layer, moisture phase transition.

Поступила 05.11.19 / Received on November 5, 2019

---