

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОГРЕВА ТОНКИХ КУСКОВ КОРЫ ПРИ ИХ СУШКЕ

В статье предложена математическая модель прогрева кусков коры дерева при малых значениях числа Био. Предложены расчетные зависимости для времени прогрева тонких частиц коры при сушке.

Прогрев, кора деревьев, выход влаги, уравнение теплового баланса, экспериментальные данные.

The paper presents the mathematical model of heating the pieces of tree bark at small values of the Bio. The authors proposed the calculated dependence for the time of warming-up the thin pieces of the bark during drying.

Warming up, bark of trees, moisture, heat balance equation, experimental data.

Введение.

Возобновляемые источники энергии, важнейшим из которых является энергия, аккумулированная в растительности, могут сыграть существенную роль в решении энергетических проблем [1], [3]–[5]. Поэтому биоэнергетике последнее время уделяется большое внимание. По оценке экспертов, к 2020 г. доля энергии, вырабатываемой с помощью возобновляемых источников, должна составлять не менее 7 % в суммарном энергетическом балансе РФ [5]. Суммарный объем древесной биомассы на Земле оценивается примерно в 420 млрд т., при этом значительная часть данных ресурсов сосредоточена в Южной Америке и около 27 % в Бразилии [4]. РФ обладает почти четвертью мировых запасов древесины, однако рациональное использование ее находится на низком уровне. Для энергетических целей целесообразно использовать неделовую древесину и отходы, образующиеся при обработке и переработке древесины, не находящие другого применения. Основные проблемы, возникающие при сжигании древесного топлива, связаны с его высокой влажностью, которая значительно уменьшает теплотворную ценность топлива, ухудшает процесс горения и снижает экономические показатели работы котлов. При сжигании древесного топлива температура уходящих газов может быть снижена почти до 80...90 °С [4], что позволяет существенно повысить КПД котлов. Технология энергетического использования древесных отходов имеет разную степень распространенности, освоенности и эффективности [5]. Постоянно ведутся исследования по разработке новых технологий и совершенствованию существующих. Теплотехнические технологические свойства биотоплив оказывают существенное влияние на конструкцию топочных устройств и в значительной мере определяют показатели работы утилизационно-энергетических устройств. Исследование процессов, протекающих при прогреве, позволяет проводить комплексный анализ процессов тепло- и массообмена для одиночных частиц при условиях, близких к условиям реальной топочной камеры. Поэтому прогрев и сушка одиночных кусков коры дерева является актуальной задачей.

Основная часть.

При сушке и сжигании коры дерева в технических устройствах возникает необходимость определить продолжительность прогрева материала до температуры начала выхода влаги, продолжительность выхода влаги, время начала выхода летучих веществ.

Напишем уравнение теплового баланса для плоской частицы ($Bi < 0,1$), омываемой потоком газа в период до начала выхода влаги, когда отсутствуют эндо и экзотермические реакции:

$$m_{\text{ч}} \cdot c_{\text{ч}} \frac{dT_{\text{ч}}}{d\tau} = \alpha_{\text{к}} (T_{\text{г}} - T_{\text{ч}}) F_{\text{пов}} + \sigma_0 a_{\text{ч}} (T_{\text{г}}^4 - T_{\text{пов}}^4) F_{\text{пов}}, \quad (1)$$

где индекс «ч» означает «частица»; $F_{\text{пов}}$, $a_{\text{ч}}$ – площадь поверхности и степень черноты частицы; $T_{\text{г}}$ – температура потока газов; σ_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела; $m_{\text{ч}}$, $c_{\text{ч}}$, $a_{\text{ч}}$ – масса, удельная теплоемкость, температуропроводность частицы.

$$m_{\text{ч}} = V_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{ч}}; \quad \alpha_{\text{к}} = Nu \lambda_{\text{г}} / d; \quad F_{\text{пов}} = 2 F_{\text{ч}},$$

где $\rho_{\text{ч}}$ – плотность материала частицы; Nu – критерий Нуссельта – рассчитывается с учетом относительного движения частицы и потока газов.

Уравнение теплового баланса для плоской частицы, омываемой потоком газов в период выхода влаги, имеет вид:

$$-\left[r_{\text{исп}} + c_{\text{рп}} (T_{\text{г}} - T_{\text{ч}})\right] \cdot G_{\text{п}} = \alpha_{\text{к}} [T_{\text{г}} - T_{\text{ч}}] F_{\text{пов}} + \sigma_0 a_{\text{ч}} (T_{\text{г}}^4 - T_{\text{пов}}^4) F_{\text{пов}}, \quad (2)$$

где $G_{\text{п}}$ – поток паров с поверхности пластины; $r_{\text{исп}}$ – удельная теплота испарения жидкости; $c_{\text{рп}}$ – удельная теплоемкость паров; $T_{\text{пов}}$ – температура поверхности пластины, которую будем считать равной температуре кипения $T_{\text{кип}}$ воды.

Уравнение теплового баланса для плоской стенки, омываемой потоком газа в период прогрева до начала выхода летучих веществ, имеет вид:

$$m_{\text{сч}} \cdot c_{\text{сч}} \frac{dT}{d\tau} = \alpha_k (T_{\Gamma} - T_{\text{ч}}) F_{\text{пов}} + \sigma_0 a_{\text{сч}} (T_{\Gamma}^4 - T_{\text{ч}}^4) F_{\text{пов}}, \quad (3)$$

где $m_{\text{сч}}$ и $c_{\text{сч}}$ – масса и удельная теплоемкость сухой частицы; $a_{\text{сч}}$ – степень черноты сухой частицы.

Решение уравнений (1)–(3) проводится методом Рунге – Кутты. Обработка опытных данных [2] позволила получить расчетные формулы.

Результаты расчета температуры прогрева материала до температуры кипения воды представлены на рис. 1. Отклонение температуры от расчетной по аналитическим зависимостям не более 6,29 %.

Результаты расчета выхода влаги при температуре 100°C представлены на рис. 2. Отклонения расчетных данных от экспериментальных не превышает 4,25 %.

Результаты расчета прогрева сухой коры до температуры начала выхода летучих при температуре 140 °C представлены на рис. 3.

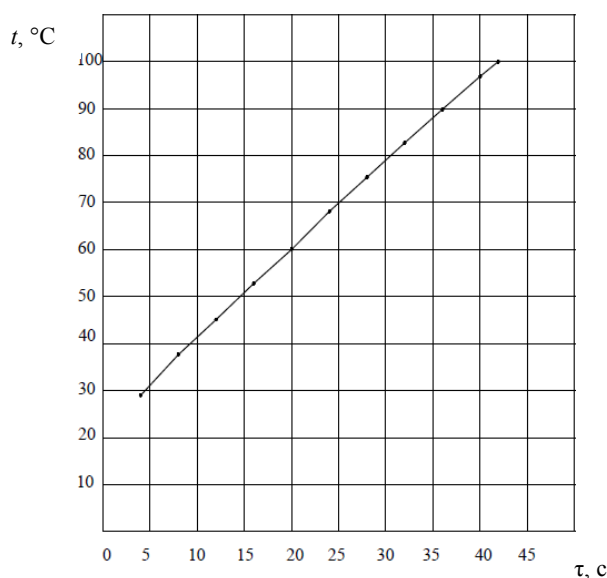


Рис. 1. Зависимость температуры от времени при прогреве материала до 100 °C

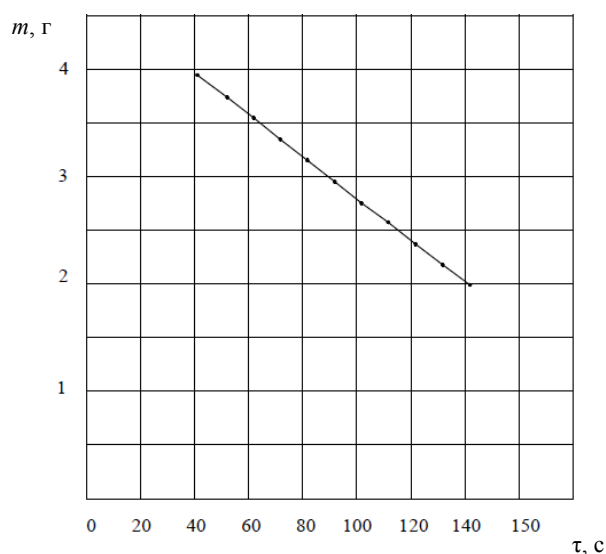


Рис. 2. Расчет выхода влаги при температуре 100°C

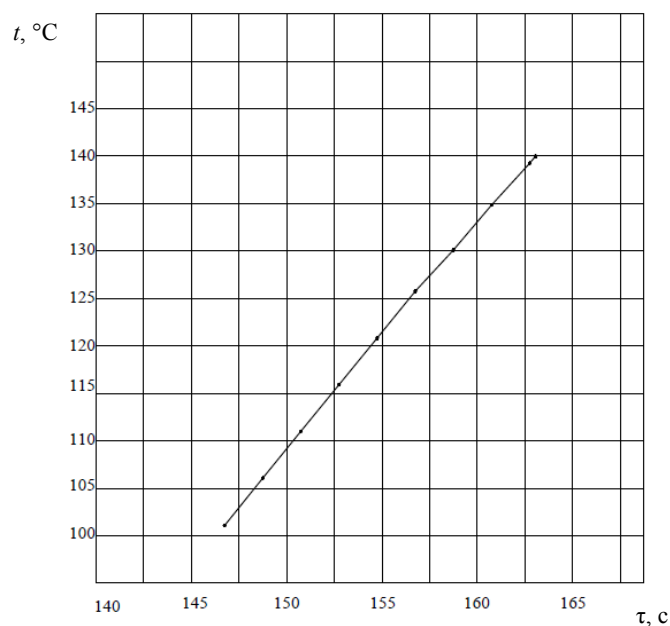


Рис. 3. Прогрев сухой коры до температуры начала выхода летучих

Отклонение температуры от рассчитанной по аналитическим зависимостям не превышает 8,2 %. Время начала выхода летучих – расчетное значение и экспериментальное расходятся не более чем на 12,9 %.

Обобщение расчетных данных по времени начала кипения воды в коре представлено формулой:

$$Bi \cdot Fo = -9,9 \cdot 10^{-7} \left(\frac{Ko}{K_T} \right) + 1,1 \cdot 10^{-7} (\delta = 3,39\%).$$

Обобщенные расчетные данные по времени окончания сушки коры могут быть выражены зависимостью:

$$Bi \cdot Fo = 3,0 \cdot 10^{-9} \left(\frac{Ko}{K_T} \right) + 2,8 \cdot 10^{-7} (\delta = 1,71\%).$$

Обобщенные расчетные данные по времени начала выхода летучих веществ из коры имеют вид:

$$Bi \cdot Fo = 2,15 \cdot 10^{-9} \left(\frac{Ko}{K_T} \right) + 3,3 \cdot 10^{-7} (\delta = -0,77\%).$$

Здесь $Bi = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$ – число Био, $Fo = \frac{a \cdot \tau}{l}$ – число Фурье, α – коэффициент теплоотдачи, l – полутолщина пластины из коры, λ – коэффициент теплопроводности влажной коры, a – коэффициент температуропроводности коры, τ – время прогрева до температуры начала выхода и окончания выхода влаги из коры; и время начала выхода летучих веществ из коры $Ko = \frac{L \cdot W \cdot \rho_2}{c_1 \cdot \rho_2 (T_\phi - T_c)}$ – число Коссовича;

$K_T = \frac{T_o - T_\phi}{T_\phi - T_c}$ – температурный критерий. Отноше-

ние этих чисел $\frac{Ko}{K_T} = \frac{L \cdot W \cdot \rho_2}{c_1 \cdot \rho_1 (T_o - T_\phi)}$, где L – теплота испарения влаги; W – количество влаги в кг на 1 кг сухого материала; c_1 и ρ_1 – удельная теплоемкость и плотность сухого материала, T_o и T_ϕ – начальная температура материала и температура кипения воды.

Продолжительность периодов определяется по формулам:

$$t < 100^\circ\text{C} - Bi \cdot Fo = -9,9 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{Ko}{K_T} + 1,1 \cdot 10^{-7}$$

$$(\delta = 3,39\%);$$

$$t = 100^\circ\text{C} - Bi \cdot Fo = 3,0 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{Ko}{K_T} + 2,8 \cdot 10^{-7}$$

$$(\delta = 1,71\%);$$

$$100^\circ\text{C} < t < 140^\circ\text{C} - Bi \cdot Fo = 2,15 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{Ko}{K_T} + 3,3 \cdot 10^{-7}$$

$$(\delta = -0,77\%).$$

Результаты расчетов получены при следующих исходных данных: влажность на рабочую массу $W_t^r = 35 \dots 70\%$, содержание золы в сухой массе коры $A^d = 2,0\%$ для сосны, $A^d = 2,3\%$ для ели, $A^d = 2,4\%$ для березы. Плотность абсолютно сухой коры: 652 кг/м³ для сосны, 715 кг/м³ для ели, 736 кг/м³ для березы. Плотность влажного материала изменялась от 873 кг/м³ до 1890 кг/м³. Коэффициенты теплопроводности имели значения 0,146...0,828 Вт/(м² К). Удельная теплоемкость изменялась в пределах 1,69...2,25 кДж/(кг К).

Выводы.

Таким образом предложенные зависимости можно использовать при расчете времени прогрева плоских кусков коры до начала выхода влаги, выхода влаги и до начала выхода летучих веществ в технических устройствах для сушки материала.

Литература

1. Головкин, С. И. Энергетическое использование древесных отходов / С. И. Головкин, И. Ф. Коперин, В. И. Найденов. – М., 1987.
2. Домрачев, Д. А. Исследование динамики прогрева на экспериментальной установке / Д. А. Домрачев, Н. Н. Сеницын // Современные материалы, техника и технология: Международная научно-практическая конференция. – Курск, 2011.
3. Любов, В. К. Повышение эффективности энергетического использования биотоплив / В. К. Любов, С. В. Любова. – Архангельск, 2010.
4. Любов, В. К. Энергетическое использование биотоплива / В. К. Любов. – Архангельск, 2007.
5. Федоров, Ю. Н. Потенциал и экономические перспективы развития биоэнергетики в Российской Федерации / Ю. Н. Федоров, И. Е. Шелковенков // Биоэнергетика. – 2008. – №2(11). – С. 62–65.