

Моделирование процесса сушки древесного сырья для последующего использования его при копчении рыбы

Сергей Б. Луковкин¹ lukovkinsb@mstu.edu.ru
Людмила И. Хохлова¹ xoxlovaluda@mstu.edu.ru
Сергей А. Шиманский¹ shimanskiysa@mstu.edu.ru

¹ Мурманский государственный технический университет, Морской институт, ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, 183010, Россия

Реферат. Модели многих технологических процессов (сушка древесины, копчение и сушка рыбы) описываются уравнениями в частных производных. К таким моделям относится и рассматриваемая здесь модель процесса сушки сырья на примере сушки древесины. Рассматриваемая в статье модель сушки сырья, основана на уравнении теплопроводности с переменными коэффициентами. Физические свойства древесины в процессе сушки изменяются, поэтому и коэффициенты уравнения изменяются по некоторому заданному закону. Модель становится существенно нелинейной. Как правило, получить решение для таких моделей в явном виде невозможно. В этом случае становится актуальной задача разработки численных методов решения модельных уравнений и написание соответствующих программ для проведения компьютерного моделирования технологических процессов. Наличие таких программ позволяет исследователям решать задачи по подбору оптимальных параметров и оптимальных условий протекания изучаемых технологических процессов, определять необходимое время достижения желаемых значений целевых функций. На основе полученных расчётных формул разработана программа моделирования теплового поля в пакете MatLab, которая может быть использована для моделирования процесса сушки древесины при различных условиях. В статье приводятся примеры модельных вычислений для различных значений параметров сырья. Технологические процессы, связанные с нагревом или сушкой исходного сырья, наблюдаются при копчении или при сушке рыбы. Предложенный здесь алгоритм может быть, после некоторой модификации, использован и для их моделирования.

Ключевые слова: моделирование, программирование, технология, процесс, сушка, древесина, уравнение, теплопроводность

Modeling of drying process of wood raw material for its subsequent use at fish smoking

Sergei B. Lukovkin¹ lukovkinsb@mstu.edu.ru
Ludmila I. Hohlova¹ xoxlovaluda@mstu.edu.ru
Sergey A. Shimanskiy¹ shimanskiysa@mstu.edu.ru

¹ Murmansk State Technical University, Maritime Institute, Sportivnaya Str., 13, Murmansk, 183010, Russia

Summary. Models of many technological processes (drying, Smoking and drying fish) are described by equations. Such models and applies the model of drying process of raw materials for example wood drying. The article considered a model of drying of raw materials based on the heat equation with variable coefficients. Physical properties of wood during the drying process change, and therefore the equation coefficients are changed according to some given law. The model becomes essentially nonlinear. As a rule, to obtain the solution for such models explicitly impossible. In this case, it becomes the actual task of developing numerical methods for solving model equations and writing of appropriate programs for computer simulation of technological processes. The existence of such programs allows researchers to solve the problem of selecting the optimal parameters and the optimum conditions of the studied technological processes to determine the time required to achieve the desired values of the objective functions. Based on the calculation formulas developed simulation program of the thermal field in MatLab that can be used to simulate the drying process under different conditions. The article provides examples of model calculations for different values of parameters of raw materials. Processes associated with heating or drying of the feedstock, are observed when Smoking or drying fish. The suggested algorithm can be, after some modifications, used for their modeling.

Keywords: modeling, programming, technology, process, drying, wood, equation, thermal conductivity

Введение

Во многих странах мира уже достаточно давно ведутся работы по изучению использования альтернативных возобновляемых источников энергии, например таких, как биомасса (древесные отходы, щепа, гранулы из древесины). Процесс сушки древесного сырья включен в технологические процессы производства некоторых продуктов питания, например, при копчении и сушке рыбы [1].

Для цитирования

Луковкин С.Б., Хохлова Л.И., Шиманский С.А. Моделирование процесса сушки древесного сырья для последующего использования его при копчении рыбы // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79. № 2. С. 30–36. doi:10.20914/2310-1202-2017-2-30-36

В России подобные исследования также набирают ход. На качественное и стабильное горение биомассы влияет её влажность. В настоящей работе предлагается модель для изучения процесса сушки древесины с целью определения его продолжительности, необходимой для достижения нужного уровня влажности материала.

For citation

Lukovkin S.B., Hohlova L.I., Shimanskiy S.A. Modeling of drying process of wood raw material for its subsequent use at fish smoking. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2017. vol. 79. no. 2. pp. 30–36. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2017-2-30-36

Метод решения задачи

Процесс сушки древесной коры происходит при следующих условиях: кора имеет форму бесконечного плоского слоя заданной толщины; осуществляется принудительный нагрев конвекцией высокотемпературного газа одной из сторон этого слоя. В начале процесса кора имеет повышенную влажность. Процесс заканчивается, когда кора становится «достаточно» сухой. Параметры древесины в процессе сушки изменяются, так как зависят от влажности материала [2–4].

Для изучения процесса сушки древесной коры можно предложить следующую математическую модель, основанную на уравнении теплопроводности:

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \right), \quad (1)$$

где $U = U(x, t)$ – температура материала в точке с координатой x в момент времени t ; x изменяется от 0 до S ; время t от 0 до некоторого момента t_k , здесь S – толщина древесного слоя. Следовательно, область интегрирования уравнения (1) задаётся неравенствами:

$$0 \leq x \leq S; \quad 0 \leq t \leq t_k \quad (2)$$

Зададим начальное условие (начальное распределение температуры вдоль оси x):
при $t = 0$

$$U(x, 0) = u_0, \quad (3)$$

и граничные условия:
при $x = 0$

$$-\lambda \frac{\partial U}{\partial x} = \alpha(u_{\max} - U), \quad (4)$$

при $x = S$

$$\lambda \frac{\partial U}{\partial x} = 0, \quad (5)$$

В формулах (1)–(5) используются следующие параметры: c – эффективная теплоёмкость; ρ – плотность материала, $U = U(x, t)$ – температура участка коры с координатой x в момент времени t ; λ – коэффициент теплопроводности; α – коэффициент теплоотдачи; $\Delta U = U_d - U_w > 0$ – интервал температур, где U_d – температура «сухой» зоны материала, U_w – температура «влажной» зоны. Предполагается, что в начальный момент времени весь материал сырой и его температура не превосходит U_w .

Затем начинается обдув одной из поверхностей коры горячим газом, что приводит к её нагреву и постепенному «высыханию». При этом параметры модели c , ρ , λ меняются по некоторым заданным законам. Процесс сушки должен завершиться при достижении некоторого заданного уровня содержания влаги в материале.

Обозначим через ψ долю влажного материала. Очевидно, что ψ может непрерывно изменяться от 1 (весь материал влажный) до 0 (весь материал сухой). Закон изменения ψ можно выбрать в виде:

$$\psi = \begin{cases} 1, & U < U_w; \\ \frac{U_d - U}{U_d - U_w}, & U_w \leq U \leq U_d; \\ 0, & U > U_d. \end{cases} \quad (6)$$

Те участки коры, где температура $U < U_w$ считаются полностью влажными, а там где $U > U_d$ – материал полностью сухой.

Эффективная теплоёмкость можно определить следующим образом:

$$c = \begin{cases} c_w, & U < U_w; \\ c_w \cdot \psi + c_d \cdot (1 - \psi), & U_w \leq U \leq U_d; \\ c_d, & U > U_d. \end{cases} \quad (7)$$

где c_w, c_d – теплоёмкости влажного и сухого материала; g – доля влаги в элементарном объёме сухого материала; L – удельная теплота испарения влаги.

Коэффициент теплопроводности материала определяется по формуле:

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_w, & U < U_w; \\ \lambda_w \cdot \psi + \lambda_d \cdot (1 - \psi), & U_w \leq U \leq U_d; \\ \lambda_d, & U > U_d. \end{cases} \quad (8)$$

где λ_w, λ_d – коэффициенты теплопроводности влажного и сухого материала.

Плотность материала определяется по формуле:

$$\rho = \begin{cases} \rho_w, & U < U_w; \\ \rho_w \cdot \psi + \rho_d \cdot (1 - \psi), & U_w \leq U \leq U_d; \\ \rho_d, & U > U_d. \end{cases} \quad (9)$$

где ρ_w, ρ_d – плотности влажного и сухого материала.

Решение уравнения (1) при рассмотренных ограничениях (3)–(5) с учётом зависимостей (7)–(9) может быть получено только численно. Мы предлагаем использовать явную схему метода конечных разностей. Полученное решение при этом будет условно устойчивым.

Учитывая зависимость $\Delta = \Delta(U(x, t))$ в виде (8) можно выразить

$$\frac{\partial \lambda}{\partial x} = \frac{d\lambda}{dU} \cdot \frac{\partial U}{\partial x}; \quad (10)$$

Тогда уравнение (1) можно записать в виде:

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial \lambda}{\partial x} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + \lambda \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial x^2},$$

или, с учётом (10), в виде:

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial \lambda}{\partial U} \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \lambda \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}. \quad (11)$$

Для вычисления $\frac{\partial \lambda}{\partial U}$ будем использовать зависимость $\Delta = \Delta(\psi(U))$:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial U} = \frac{\partial \lambda}{\partial \psi} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial U} = \frac{(\lambda_w - \lambda_d)}{(U_w - U_d)} = \frac{\Delta \lambda}{\Delta U}, \quad (12)$$

$$\Delta \lambda = \lambda_d - \lambda_w$$

Проведём разбиение области интегрирования (2) следующим образом: равномерно разобьём отрезок $[0, S]$ с помощью J узлов по переменной x ; равномерно разобьём отрезок $[0, t_k]$ с помощью N узлов по переменной t . Вычислим шаг h по переменной x и шаг Δt по времени t :

$$h = S / (J - 1), \quad \Delta t = t_k / (N - 1). \quad (13)$$

Узлы сетки по t и по x :

$$t_n = (n - 1) \cdot \Delta t, \quad n = 1..N;$$

$$x_j = (j - 1) \cdot h, \quad j = 1..J. \quad (14)$$

Функцию U вычисленную в узле сетки (t_n, x_j) обозначим U_j^n

Заменим в уравнении (11) производные функции $U(x, t)$ по формулам:

$$\frac{\partial U}{\partial t} \approx \frac{U_j^{n+1} - U_j^n}{\Delta t}; \quad \frac{\partial U}{\partial x} \approx \frac{U_{j+1}^n - U_j^n}{h};$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \approx \frac{U_{j+1}^n - 2U_j^n + U_{j-1}^n}{h^2} \quad (15)$$

Подставим эти выражения в уравнение (11):

$$c \cdot \rho \cdot \frac{U_j^{n+1} - U_j^n}{\Delta t} = \frac{\partial \lambda}{\partial U} \cdot \left(\frac{U_{j+1}^n - U_j^n}{h} \right)^2 +$$

$$+ \lambda \cdot \left(\frac{U_{j+1}^n - 2U_j^n + U_{j-1}^n}{h^2} \right) \quad (16)$$

Используя значения $U_{j+1}^n, U_j^n, U_{j-1}^n$ в слое $t = t_n$ из соотношения (16) можно найти значение U_j^{n+1} в слое t_{n+1} :

$$U_j^{n+1} = U_j^n + \frac{\Delta t}{c \cdot \rho h^2} \left(\frac{\partial \lambda}{\partial U} \left(\frac{U_{j+1}^n - U_j^n}{h} \right)^2 + \right.$$

$$\left. + \lambda \left(\frac{U_{j+1}^n - 2U_j^n + U_{j-1}^n}{h^2} \right) \right) \quad (17)$$

В формуле (17) индекс j изменяется от 2 до $J-1$. Для вычисления значений U в точках с индексами $(n+1, 1)$ и $(n+1, J)$ надо использовать граничные условия (4) и (5).

Рассмотрим граничное условие при $x = 0$. Разложим $U(x, t)$ в ряд Тейлора в точке $x = h$:

$$U(h, t) = U(0, t) +$$

$$+ h \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} + \frac{h^2}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \Big|_{x=0} + o(h^2); \quad (18)$$

из формулы (18) выразим

$$\frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{U_2^n - U_1^n}{h} - \frac{h}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \Big|_{x=0}. \quad (19)$$

Из уравнения (11) найдём

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{1}{\lambda} \left(c \cdot \rho \cdot \frac{\partial U}{\partial t} - \frac{\partial \lambda}{\partial U} \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 \right) \quad (20)$$

и подставим выражение (20), вычисленное при $x = 0$, в (19):

$$\frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{U_2^n - U_1^n}{h} -$$

$$- \frac{h}{2} \frac{1}{\lambda} \left(c \cdot \rho \cdot \frac{U_0^{n+1} - U_0^n}{\Delta t} - \frac{\partial \lambda}{\partial U} \left(\frac{U_2^n - U_1^n}{h} \right)^2 \right) \quad (21)$$

Подставим выражение производной

$\frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0}$ в краевое условие (4):

$$- \lambda \left(\frac{U_2^n - U_1^n}{h} - \frac{h}{2} \frac{1}{\lambda} \left(c \cdot \rho \cdot \frac{U_0^{n+1} - U_0^n}{\Delta t} - \frac{\partial \lambda}{\partial U} \left(\frac{U_2^n - U_1^n}{h} \right)^2 \right) \right) = \alpha(u_{\max} - U_1^n), \quad (22)$$

Выразим из (22) U_1^{n+1} :

$$U_1^{n+1} = U_1^n + \frac{\Delta t}{c \cdot \rho} \left(- \frac{2\alpha}{h} (U_1^n - u_{\max}) + \right.$$

$$+ \frac{2\lambda}{h^2} (U_2^n - U_1^n) + \left. + \frac{\partial \lambda}{\partial U} \cdot \left(\frac{U_2^n - U_1^n}{h} \right)^2 \right) \quad (23)$$

Формула (23) позволяет вычислить значение функции U в левом конце интервала при $x = 0$ в момент $t = t + \Delta t$, если известны значения U в момент времени t при $x = 0$ и $x = h$.

Рассмотрим теперь граничное условие при $x = S$. Поступим аналогичным образом, разложим $U(x, t)$ в ряд Тейлора в точке $x = S$ при заданном t :

$$U(S - h, t) = U(S, t) - h \cdot \left. \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x=S} + \frac{h^2}{2} \left. \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right|_{x=S} + o(h^2) \quad (24)$$

Выразим из (24) $\left. \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x=S}$:

$$\left. \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x=S} = \frac{U(S, t) - U(S - h, t)}{h} + \frac{h}{2} \left. \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right|_{x=S} = \frac{U_J^n - U_{J-1}^n}{h} + \frac{h}{2} \left. \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right|_{x=S}; \quad (25)$$

Значение $\left. \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right|_{x=S}$ найдём из уравнения (11) при $x = S$, учитывая краевое условие (5):

$$\left. \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right|_{x=S} = \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \left. \frac{\partial U}{\partial t} \right|_{x=S} \approx \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \frac{U_J^{n+1} - U_J^n}{\Delta t}; \quad (26)$$

Подставим (26) в (25), учитывая, что $\left. \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x=S} = 0$:

$$\frac{U_J^n - U_{J-1}^n}{h} + \frac{h}{2} \left(\frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot \frac{U_J^{n+1} - U_J^n}{\Delta t} \right) = 0;$$

Выразим

$$U_J^{n+1} : U_J^{n+1} = U_J^n + \frac{2\lambda}{h^2} \frac{\Delta t}{c\rho} (U_{J-1}^n - U_J^n). \quad (27)$$

Формулы (17), (23) и (27) задают вычислительный процесс для определения температуры $U(x, t + \Delta t)$ при известных значениях $U(x, t)$.

Для компьютерного моделирования процесса сушки была разработана программа в среде Matlab (см. приложение)

Программа работает в соответствии с алгоритмом, описанным выше. Основная программа формирует вектор параметров

модели, массивы времени t и координаты x . Функция **nagrev2** проводит вычисления температуры в узлах сетки в соответствии с формулами (17), (23) и (27). Функция **param** вычисляет параметры модели в соответствии с формулами (6)–(9). Нужно отметить, что начальное распределение температуры вдоль оси x может быть неравномерным, т. е. оператор под номером 24 в функции **nagrev2** можно задать так, что значения $u(0, x)$, будут меняться по заданному закону. Например,

$$u(1, 1 : J) = u0 - \left(\frac{x(1 : J) - 0.25}{x(J)} \right)^2 \times u0 + 0.1u0; \quad (28)$$

$$u(1, 1 : J) = u0abs \left(\frac{x(1 : J) - 0.25}{x(J)} \right) \times u0 + 0.1u0; \quad (29)$$

Функция (28) – «перевернутая» парабола, сдвинутая вверх на 1.1u0 и вправо по оси x на 0.25. Функция (29) – «модуль» x , сдвинутый вверх на 1.1u0 и вправо по оси x на 0.25.

Расчёты проводились при следующих значениях исходных данных: время $t = 0.60$ с, число дискретов 201; для переменной x толщина слоя древесины $S = 0.5$, число дискретов 21; при $x = 0$ температура обдува 126 градусов; коэффициент теплоотдачи $\alpha = 20$; начальное распределение температуры при $t = 0$: $u0 = 30$; температура влажной и сухой зоны: $U_w = 40$ и $U_d = 80$; теплоёмкость влажной и сухой древесины $c_w = 3.6$ и $C_d = 2.2$; плотность влажной и сухой древесины $\rho_w = 600$ и $\rho_d = 400$; теплопроводность влажной и сухой древесины $\lambda_w = 0.35$ и $\lambda_d = 0.20$.

На рисунке 1 представлены графики изменения температуры вдоль оси ОХ через равные промежутки времени (0.3 с) от 0 до 60 при: а) постоянном $u0 = 30$ начальном значении температуры; б) при начальном распределении температуры в соответствии с формулой (28); в) при начальном распределении температуры в соответствии с формулой (29); д) при начальном значении, равном конечному распределению температуры, полученному в 1 случае, но «перевернутым» относительно оси ОХ. Это процесс сушки древесины, при котором древесина сушится сначала с одной, а затем с другой стороны.

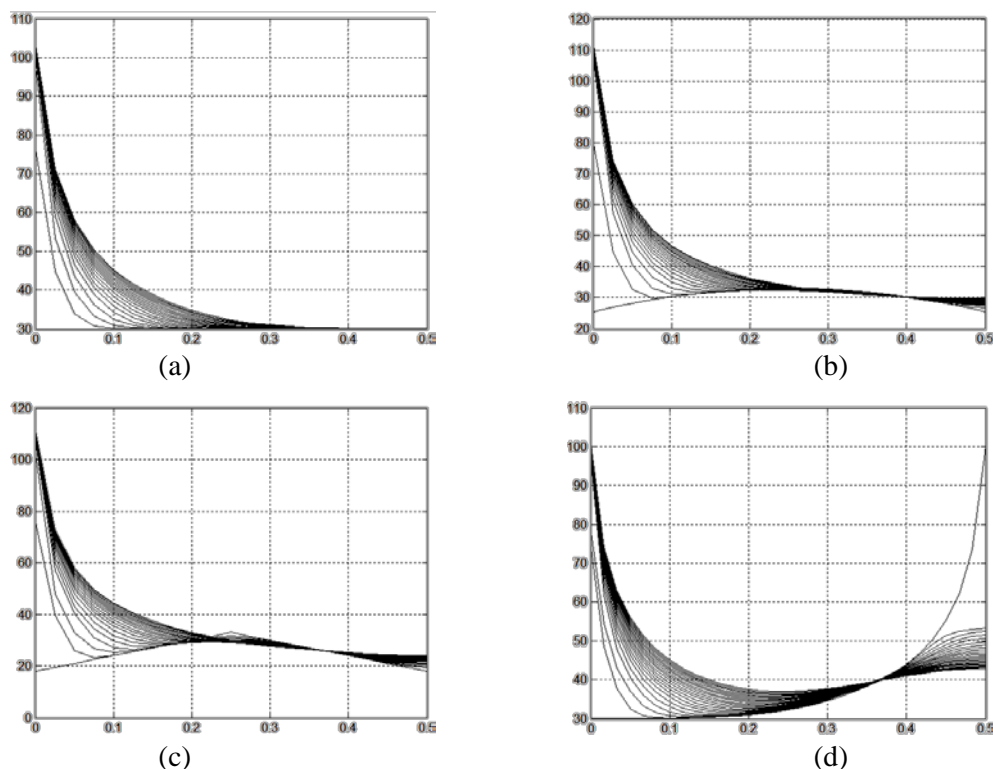


Рисунок 1. Графики изменения температуры вдоль оси OX

Figure 1. Graphs of temperature variation along the axis OX

Результаты и обсуждение

На основе полученных расчётных формул (17), (23) и (27) написана программа в среде MatLab и проведено компьютерное моделирование процесса сушки древесины. Результаты работы программы для различных начальных условий распределения представлены в виде графиков распределения температуры $u(t, x)$ (ось OY) вдоль оси OX при различных значениях времени t .

Важным моментом подобных расчётов является выбор шага дискретизации по времени t и пространственной переменной x [5–6]. В этом варианте использовалась явная схема сеточного метода, которая является условно устойчивой. В условиях классической постановки задачи для уравнения теплопроводности с постоянными коэффициентами шаг по x и по t рекомендуется выбирать так, чтобы значение выражения $(1-2s)$ было положительным, где $s = k \cdot Dt / (Dx)^2$, а коэффициент k – удельная теплопроводность материала. Это означает, что $s < 0.5$ и шаги по t и по x должны быть согласованы. Для этой задачи выбор шага по t и по x делается путём подбора, так как коэффициенты модели меняются.

В качестве дальнейшего развития данной модели можно разработать алгоритм моделирования процесса сушки с применением метода прогонки – это будет неявная схема решения задачи, но более устойчивая. Кроме этого, можно аппроксимировать кусочно-линейные зависимости (7)–(9) с помощью гладких зависимостей типа «арктангенс», что также должно улучшить качество процесса моделирования процесса сушки.

Заключение

В результате проведенного исследования разработана модель процесса сушки древесины, которая, в частности, может быть использована для изготовления коптильных сред, используемых далее по назначению. Модель может быть использована в системах автоматического управления при альтернативных технологиях получения энергии с использованием биомассы.

Благодарности

Выражаем благодарность к.т.н., профессору А.М. Прохоренкову за постановку задачи и консультации в ходе выполнения работы и д.т.н., профессору Ю.В. Шокиной за консультации в области физических свойств древесины и обсуждение полученных результатов.

Приложение

```

1. % основная программа моделирования
   процесса сушки startnagrev2.m
2. S=0.5; % толщина слоя по x
3. tmax=60; % интервал времени по t
4. kmax=201; % количество дискретов по
   t;
5. xv=linspace(0,S,21);
6. tv=linspace(0,tmax,kmax);
7. vpar(1)=126; % температура обдува
8. vpar(2)=20; % alfa = коэфф. теплоот-
   дачи
9. vpar(3)= 30; % начальное распределе-
   ние температуры вдоль x
10. vpar(4)= 40; % температура влажной
    зоны
11. vpar(5)= 80; % температура сухой зоны
12. vpar(6)= 3.6 % теплоёмкость влажной
    древесины
13. vpar(7)= 2.2 % теплоёмкость сухой
    древесины
14. vpar(8)= 600 % плотность влажной дре-
    весины
15. vpar(9)= 400 % плотность сухой древе-
    сины
16. vpar(10)= 0.35 % теплопроводность
    влажной древесины
17. vpar(11)= 0.200 % теплопроводность
    сухой древесины
18. uv=nagrev2(tv,xv,vpar);
19. prn3d=input('введите 1 для формирова-
    ния графика 3D = ');
20. if prn3d==1
21. surf(xv,tv,uv)
22. xlabel x;
23. ylabel t;
24. zlabel U(x,t);
25. else
26. k=1;
27. while k<kmax,
28. plot(xv,uv(k,:), 'k-')
29. hold on
30. k=k+10;
31. end;
32. end;
33. %plot(xv,uv(200,:), 'r-')
34. grid on

```

```

1. function u = nagrev2(t,x,vp)
2. % здесь проводятся вычисления в соот-
   ветствии с алгоритмом
3. % см. формулы (17), (23) и (27)
4. umax=vp(1); %температура обдува
5. alf=vp(2); % коэфф. теплоотдачи
6. u0=vp(3); % начальное распределение
   температуры вдоль x
7. u1=vp(4); % температура влажной зоны
8. u2=vp(5); % температура сухой зоны
9. -----

```

```

10. c1= vp(6); % теплоёмкость влажной
   древесины
11. c2=vp(7); % теплоёмкость сухой дре-
   весины
12. % плотность
13. r1=vp(8);
14. r2=vp(9);
15. % теплопроводность
16. L1= vp(10);
17. L2=vp(11);
18. J=length(x);
19. N=length(t);
20. h=mean(diff(x));
21. dt=mean(diff(t));
22. ss=2*dt/(h^2);
23. u=zeros(N,J);
24. u(1,:)=u0; % начальное распределение
   температуры вдоль x
25. for n=1:N-1
26. [c,L,r,pL]=param(u(n,1),u1,u2,c1,c2,L
   1,L2,r1,r2);
27. % граничные условия слева: x=0
28. upp=alf*(-umax+u(n,1))/L-( u(n,2)-
   u(n,1) )/h;
29. u(n+1,1)=u(n,1)+(-2*L/h*upp+...
30. +pL*(u(n,2)-
   u(n,1))^2/(h*h))*dt/(c*r);
31. % граничные условия справа: x=S
32. [c,L,r,pL]=param(u(n,J),u1,u2,c1,c2,L
   1,L2,r1,r2);
33. u(n+1,J)=u(n,J)+(dt*2*L)/(c*r*h*h)*(u
   (n,J-1)-u(n,J));
34. for j=2:J-1
35. [c,L,r,pL]=param(u(n,j),u1,u2,c1,c2,L
   1,L2,r1,r2);
36. u(n+1,j)=u(n,j)+dt/((c*r*h*h)*(pL*(u(n
   ,j+1)-u(n,j))^2+...
37. +L*(u(n,j+1)-2*u(n,j)+u(n,j-1))));
38. end
39. end

```

```

1. function
   [c,L,r,pL]=param(t,t1,t2,c1,c2,L1,L2,
   r1,r2)
2. % вычисления по формулам (6) - (8)
3. if t<t1 psi=1;
4. elseif t>t2 psi=0; else psi=(t2-
   t)/(t2-t1);
5. end;
6. if t<t1 c=c1; elseif t>t2 c=c2;
7. else c=c1*psi+c2*(1-psi);end;
8. if t<t1 L=L1; elseif t>t2 L=L2;
9. else L=L1*psi+L2*(1-psi);end;
10. if t<t1 r=r1; elseif t>t2 r=r2;
11. else r=r1*psi+r2*(1-psi);end;
12. if t<t1 | t>t2 pL=0; else pL=(L1-
   L2)/(t1-t2); end;
13. end

```

ЛИТЕРАТУРА

1 Kartha S., Larson E.D. Bureau for Development Policy, Energy and Atmosphere Programme // Bioenergy Primer: Modernised Biomass Energy for Sustainable Development, UNDP/BDP, 2000, Energy and Environment Group, New York, USA

2 Laurila J., Havimo M., Lauhanen R. Compression drying of energy wood // Fuel Processing Technology. 2014. Т. 124. С. 286-289.

3 Zhao J. и др. Modeling conventional drying of wood: Inclusion of a moving evaporation interface // Drying Technology. 2016. Т. 34. №. 5. С. 530-538.

4 Tkachov V. S., Yurkov S., Yurkova V. Definition of rational mode of wood drying with the use of adaptive, regression model // Bulletin of Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture. 2014. № 6. С. 12-15.

5 Галкин В. П. и др. Математическая модель системы контроля процесса сушки древесины в поле СВЧ // Вестник Московского государственного университета леса. 2015. Т. 19. №. 1.

6 Гороховский А. Г., Шишкина Е. Е., Чернышев О. Н. Оптимальное управление процессами тепло-массообмена при конвективной сушке древесины // Современные проблемы науки и образования. 2014. №. 6.

REFERENCES

1 Kartha S., Larson E.D. Bureau for Development Policy, Energy and Atmosphere Programme. *Bio-energy Primer: Modernised Biomass Energy for Sustainable Development*, UNDP/BDP, 2000. Energy and Environment Group, New York, USA

2 Laurila J., Havimo M., Lauhanen R. Compression drying of energy wood. *Fuel Processing Technology*. 2014. vol. 124. pp. 286–289.

3 Zhao J. et al. Modeling conventional drying of wood: Inclusion of a moving evaporation interface. *Drying Technology*. 2016. vol. 34. no. 5. pp. 530–538.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Сергей Б. Луковкин к. филос. наук, доцент, кафедра автоматики и вычислительной техники, Мурманский государственный технический университет, Морской институт, ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, 183010, Россия, lukovkinsb@mstu.edu.ru

Людмила И. Хохлова к. филос. наук, доцент, кафедра математики, информационных систем и программного обеспечения, Мурманский государственный технический университет, Морской институт, ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, 183010, Россия, xoxlovaluda@mstu.edu.ru

Сергей А. Шиманский аспирант, кафедра математики, информационных систем и программного обеспечения, Мурманский государственный технический университет, Морской институт, ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, 183010, Россия, shimanskiysa@mstu.edu.ru

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Сергей Б. Луковкин предложил методику проведения эксперимента

Людмила И. Хохлова выполнила расчёты

Сергей А. Шиманский написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 14.01.2017

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 10.02.2017

4 Tkachov V. S., Yurkov S., Yurkova V. Definition of rational mode of wood drying with the use of adaptive, regression model. *Bulletin of Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2014. no. 6. pp. 12–15.

5 Galkin V.P. et al. Mathematical model of the system of control of process of drying wood in the microwave. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa* [Proceedings of Moscow state forest University]. 2015. vol. 19. no. 1 (in Russian).

6 Gorokhovskii A.G., Shishkina E.E., Chernyshev O.N. Optimal control of heat and mass transfer processes in convective drying of wood. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2014. no. 1. (in Russian).

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Sergei B. Lukovkin candidate of philosophical sciences, associate professor, automation and computer engineering department, Murmansk state technical university, Maritime institute, Sportivnaya Str., 13, Murmansk, 183010, Russia, lukovkinsb@mstu.edu.ru

Ludmila I. Hohlova candidate of philosophical sciences, associate professor, mathematics, information systems and software department, Murmansk state technical university, Maritime institute, Sportivnaya Str., 13, Murmansk, 183010, Russia, xoxlovaluda@mstu.edu.ru

Sergey A. Shimanskiy graduate student, mathematics, information systems and software department, Murmansk state technical university, Maritime institute, Sportivnaya Str., 13, Murmansk, 183010, Russia, shimanskiysa@mstu.edu.ru

CONTRIBUTION

Sergei B. Lukovkin proposed a scheme of the experiment

Ludmila I. Hohlova performed computations

Sergey A. Shimanskiy wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 1.14.2017

ACCEPTED 2.10.2017