

УДК 532.613

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕНОСА В ДРЕВЕСИНЕ ПРИ ДОСУШКЕ ЭНЕРГИЕЙ СВЧ-ПОЛЯ

канд. техн. наук, доц. А.Л. АДАМОВИЧ, канд. техн. наук, доц. Ю.Г. ГРОЗБЕРГ,
Т.А. БУЛЬБЕНКОВА, О.А. КИЗИНА
(Полоцкий государственный университет)

Разработана физико-математическая модель тепловлагоденоса при сушке материалов в области ниже предела гигроскопичности, в том числе и с учетом нагрева энергией СВЧ-поля. Проведено численное решение разработанной системы уравнений для трех случаев сушки древесной пластины: конвективной, энергией СВЧ-поля и комбинированной, сочетающей два предыдущих способа. Представлены результаты численных расчетов, включающие распределение температуры, давления пара и влагосодержания в сечении пластины в различные моменты времени, а также изменение среднего влагосодержания и температуры в процессе сушки. Проанализированы результаты расчетов и сделаны выводы о различиях и особенностях конвективного, СВЧ и комбинированного нагрева и сушки.

Введение. Нагрев и сушка влажных материалов энергией СВЧ-поля имеет ряд преимуществ по сравнению с конвективным нагревом: большая скорость прогрева материала; создание градиента движения влаги и пара от центра материала к краям в течение всего процесса сушки; антисептический эффект, уменьшающий гниение материала. Недостатком является небольшая глубина проникновения СВЧ-поля в материал с высоким влагосодержанием, что значительно ограничивает объем загружаемого материала.

На рисунке 1 приведен график зависимости глубины проникновения СВЧ-поля частотой 2,45 ГГц по мощности δ_p во влажную древесину, полученный по выражению:

$$\delta_p = \frac{1}{2 \cdot \alpha},$$

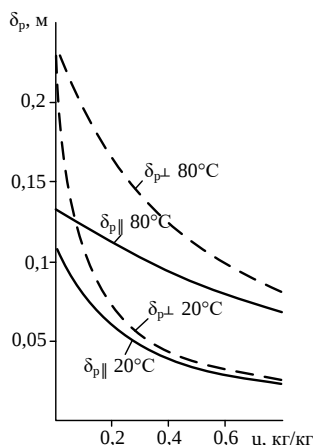
где α – постоянная затухания,

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon'}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2} - 1 \right)}. \quad (1)$$

Здесь ϵ' , ϵ'' – вещественная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости древесины, полученные в [1].

Согласно расчетам глубина проникновения энергии СВЧ-поля в древесину при перпендикулярной ориентации вектора напряженности относительно волокон при влагосодержании $u = 0,6 \dots 0,8$ кг/кг и температуре $T = 20^\circ\text{C}$ составляет менее 0,03 м, а при влагосодержании $u = 0,3 \dots 0,4$ кг/кг – 0,05...0,06 м, что примерно в 2 раза больше.

Рис. 1. Зависимость глубины проникновения СВЧ-энергии ($f_p = 2,45$ ГГц) в древесину от ее влагосодержания при температурах 20 и 80 °C при параллельной и перпендикулярной ориентации вектора напряженности СВЧ-поля относительно волокон



В связи с этим сушка с применением доступных по стоимости бытовых магнетронов с рабочей частотой СВЧ-поля $f_p = 2,45$ ГГц более целесообразна для досушки материалов до конечного влагосодержания 8...10 %, предварительно высушенных до влагосодержания $u = 0,3 \dots 0,4$ кг/кг более дешевыми способами, например, атмосферной сушкой.

Постановка задачи. Рассмотрим одномерный случай сушки пластины из древесины (рис. 2) толщиной 50 мм с начальным влагосодержанием $u_0 = 0,25$ кг/кг и температурой $T_0 = 20^\circ\text{C}$ при помощи конвективного нагрева горячим воздухом, нагрева энергией СВЧ-поля и комбинированного нагрева, сочетающего два указанных способа. Пластина расположена на расстоянии $\lambda/4 \approx 30$ мм над металлическим поддоном, отражающим прошедшую через нее волну. Для трех способов сушки необходимо определить распределение температуры T , давления пара P и влагосодержания u в сечении пластины в разные моменты времени, а также изменение среднего влагосодержания $\langle u \rangle$ и температуры $\langle T \rangle$ пластины в процессе сушки.

Для моделирования сушки использовалась система дифференциальных уравнений, описывающая тепломассообмен в капиллярно пористом теле в процессе сушки, предложенная и апробированная Н.Н. Гринчином [2] и дополненная к случаю сушки энергией СВЧ-поля уравнением Гельмгольца [3]. Необходимые физические параметры древесины принимались по [4; 5] для сосны.

При влагосодержаниях древесины ниже предела гигроскопичности $u < 30 \%$, когда вода находится в связанном состоянии, пренебрегаем диффузией воды и течениями в тонких пленках, принимая проницаемость жидкой фазы равной нулю, система уравнений будет иметь вид:

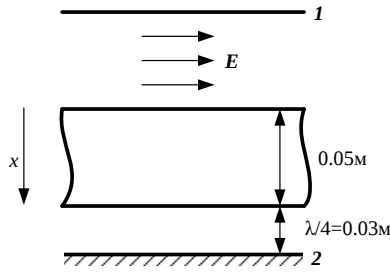


Рис. 2. Геометрия задачи моделирования

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} = I, \quad (2)$$

$$\frac{M_v}{RT} \left(m - \frac{\rho_0 u}{\rho_l} \right) \frac{\partial P}{\partial t} - \nabla K V \nabla P = -I, \quad (3)$$

$$\rho C_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \lambda \nabla T = Q + LI, \quad (4)$$

где $KV = \rho_v \frac{k k_v}{\mu_v}$, k_v – относительная фазовая проницаемость пара, $k_v = \left(\frac{u_{max} - u}{u_{max} - u_{cr}} \right)^{3,5}$; ρ_v – давление пара, $\rho_v = P M_v / (RT)$; M_v – молярная масса пара 0,018 кг/моль; m – пористость, равная 0,7; ρC_{eff} – эффективная объемная теплоемкость, $\rho C_{eff} = (1-m)C_{ps} \cdot \rho_s + m \theta_v \rho_v C_{pv} + m \theta_l \rho_l C_{pl}$ (C_{ps} , C_{pv} , C_{pl} – теплоемкость сухой древесины, пара и воды соответственно 1,56, 2 и 4,2 кДж/(кг·К); ρ_0 – плотность сухого материала 480 кг/м³; ρ_l – плотность воды 1000 кг/м³; θ_v и θ_l – насыщенность тела паром и водой соответственно, связанные соотношением $\theta_v = 1 - \theta_l = 1 - \rho_0 \frac{u}{m \rho_l}$; λ – коэффициент теплопроводности

$\lambda = \lambda_0 \cdot \lambda_{x\lambda} \cdot \lambda_{p\lambda}$, $\lambda_0 = 0,00222u(T+273) + 10^{0,295(\lg 100u - 1,022)}$, $\lambda_{p\lambda} = \frac{1}{1,846 - 0,00175 \cdot \rho_0}$; ρ_0 – базисная плотность 400 кг/м³;

k – абсолютная проницаемость (поперек волокон) 10^{-17} м²; μ_v – коэффициент динамической вязкости пара $1,6 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с); R – универсальная газовая постоянная 8,31 Дж/(моль·К); Q – мощность внутренних источников тепла за счет действия микроволн, Вт/м³; u_{max} – максимальное влагосодержание 1,8 кг/кг; u_{cr} – критическое влагосодержание 0,3 кг/кг; m – пористость 0,7.

Теплота десорбции:

$$L = r_0 + \frac{R \cdot T^2}{M_l} \left(\frac{\partial \ln P_e}{\partial T} \right) = r_0 + \frac{R \cdot T^2}{P_e \cdot M_l} \left(\frac{\partial P_e}{\partial T} \right), \quad (5)$$

где r_0 – теплота испарения свободной влаги, равная $2,3 \cdot 10^6$ Дж/кг.

Интенсивность I обмена между фазами в условиях локального термодинамического равновесия, когда влагосодержание, давление пара и температура в локальном объеме связаны изотермой десорбции, согласно [2], можно определить как

$$I = \rho_0 \frac{\partial u_e(P, T)}{\partial t}, \text{ или } I = \rho_0 \frac{\partial u_e(P, T)}{\partial t} = \rho_0 \left(\frac{\partial u_e}{\partial P} \right) \frac{\partial P}{\partial t} + \rho_0 \left(\frac{\partial u_e}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (6)$$

Следует отметить, что аналогичные результаты расчета получим, если интенсивность I массообмена между фазами задавать по формуле, предложенной П.В. Акуличем [6]:

$$I = \frac{\gamma}{P_s} (P - P_e). \quad (7)$$

Кроме того, данное выражение позволяет проводить расчет и неравновесного процесса сушки. Окончательно система уравнений тепломассообмена с учетом выражения (6) для I :

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} - \rho_0 \left(\frac{\partial u_e}{\partial P} \right) \frac{\partial P}{\partial t} - \rho_0 \left(\frac{\partial u_e}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{M_v}{RT} \left(m - \frac{\rho_0 u}{\rho_l} \right) \frac{\partial P}{\partial t} - \nabla K V \nabla P + \rho_0 \left(\frac{\partial u_e}{\partial P} \right) \frac{\partial P}{\partial t} + \rho_0 \left(\frac{\partial u_e}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad (9)$$

$$\rho C_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \lambda \nabla T - L \cdot \rho_0 \left(\frac{\partial u_e}{\partial P} \right) \frac{\partial P}{\partial t} - L \cdot \rho_0 \left(\frac{\partial u_e}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = Q. \quad (10)$$

Для вычисления производных $\frac{\partial P_e}{\partial T}$, $\frac{\partial u_e}{\partial P}$, $\frac{\partial u_e}{\partial T}$ используется выражение изотермы десорбции древесины, которая, по Г.С. Шубину [5], при влагосодержании до 30 % описывается выражением:

$$u_e = 10,6^j \frac{(3,27 - 0,015(T - 273))}{100}, \quad (11)$$

где φ – влажность, связанная с давлением пара P соотношением через давление насыщенного пара P_s :

$$\varphi = \frac{P}{P_s}, \quad P_s = 10^5 (T/373)^{15}. \quad (12)$$

Начальные и граничные условия:

$$u_0 = 0,25 \text{ кг/кг}; \quad T_0 = 300 \text{ K}; \quad P_0 = P_e(u_0, T_0);$$

$$u = u_e(P, T); \quad -\mathbf{n} \cdot \left(\rho_v \frac{kk_v}{\mu_v} \nabla P \right) = \beta(P_{inf} - P); \quad -\mathbf{n} \cdot (\lambda \nabla T) = \alpha(T_{inf} - T) + L \cdot \beta(P_{inf} - P), \quad (13)$$

где P_{inf} – давление пара в камере, Па, которое определялось по id -диаграмме в зависимости от влажности и температуры воздуха; T_{inf} – температура в камере, К; β – коэффициент парообмена, кг/(м²с·Па); α – коэффициент теплообмена, Вт/(м²К).

Мощность внутренних источников тепла за счет действия микроволн частотой f :

$$Q = 0,5 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'' \cdot |E|^2. \quad (14)$$

Распределение напряженности E СВЧ-поля описывается уравнением Гельмгольца, которое в одномерном случае имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \cdot \frac{\partial E}{\partial x} - \varepsilon \cdot k_0^2 \cdot E = 0, \quad (15)$$

где k_0 – волновое число, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{0,12236} = 51,35$ рад/м; ε – комплексная диэлектрическая проницаемость [1].

На границе 1 (см. рис. 1) задавалось условие 1-го рода (Дирихле), описывающее согласованный источник СВЧ-волны напряженностью E_0 :

$$\frac{\partial E}{\partial x} = E_0 k_0 2j - k_0 j E. \quad (16)$$

Мощность падающего поля определялась по заданной напряженности источника E_0 :

$$P_0 = 0,5 \cdot E_0^2 / 377 \text{ Вт/м}^2.$$

На границе 2 задавалось равенство нулю тангенциальной составляющей СВЧ-волны в виде условия 2-го рода (Нейман), описывающего полное отражение СВЧ-волны:

$$E = 0. \quad (17)$$

На границе раздела сред напряженность электрического поля E удовлетворяет условию непрерывности.

Обсуждение результатов. Численное решение системы уравнений (8) – (10), (15) с начальными и граничными условиями (13), (16) и (17) проводилось методом конечных элементов.

Согласно результатам моделирования, представленным на рисунке 3, видно различие между тремя способами сушки пластины:

- при СВЧ-сушке температура и давление пара (рис. 3, б, д) повышаются в центре пластины, где происходит интенсивное испарение влаги, ее движение к краям и конденсация на более холодных участках (рис. 3, и);
- при конвективной сушке увеличение температуры и давления начинается от краев образца с распространением к центру (рис. 3, а, з). Комбинированный нагрев и сушка протекают быстрее (рис. 3, л, м) и при более равномерном распределении температуры и влагосодержания в сечении пластины (рис. 3, в, к);
- при комбинированной сушке коэффициент отражения $|S_{11}|$ снижается (рис. 3, н), в отличие от СВЧ-сушки, где повышенные отражения СВЧ-волны связаны с увеличением влагосодержания на краевых участках.

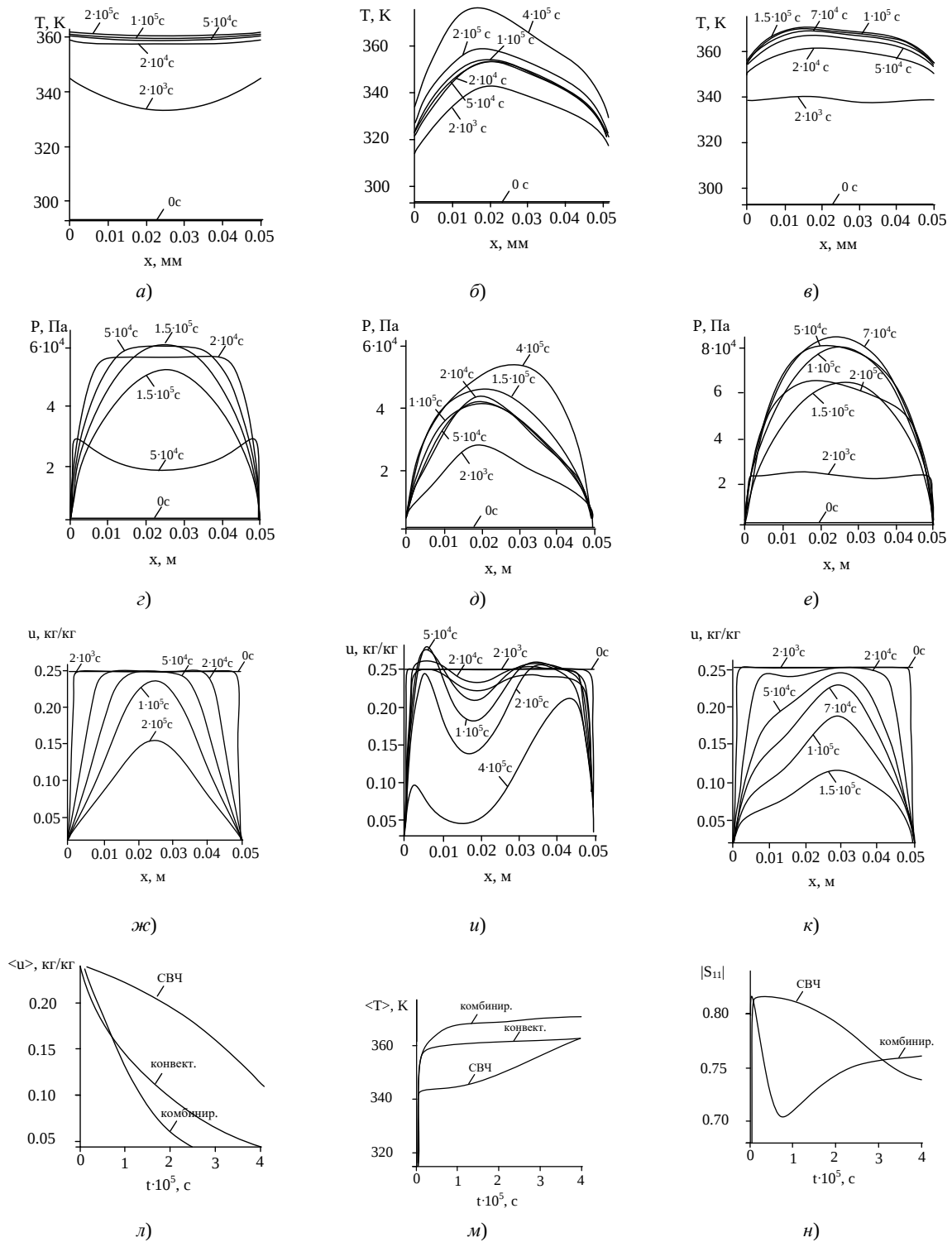


Рис. 3. Распределение в пластине температуры T (а, б, в), давления пара P (з, д, е) и влагосодержания u (ж, и, к) при конвективной (а, з, ж), СВЧ (б, д, и) и комбинированной сушке (в, е, к).

Изменение среднего влагосодержания $\langle u \rangle$ (л) и температуры $\langle T \rangle$ (м) пластины,

а также коэффициента отражения $|S_{11}|$ (н) в процессе сушки.

Параметры конвективной сушки: $\beta = 1 \cdot 10^{-7}$ кг/(м²с·Па), $\alpha = 20$ Вт/(м²·К), $\phi = 4$ %, $T_{inf} = 90$ °С, $P_{inf} = 2600$ Па;

СВЧ: $E_0 = 1650$ В/м, $\beta = 1 \cdot 10^{-7}$ кг/(м²с·Па), $\alpha = 20$ Вт/(м²·К), $\phi = 97$ %, $T_{inf} = 20$ °С, $P_{inf} = 2600$ Па;

комбинированной: $E_0 = 950$ В/м, $\beta = 1 \cdot 10^{-7}$ кг/(м²с·Па), $\alpha = 20$ Вт/(м²·К), $\phi = 91$ %, $T_{inf} = 70$ °С, $P_{inf} = 2600$ Па

На рисунке 4 приведены зависимости, по которым можно ориентировочно определить необходимую мощность СВЧ-генераторов для нагрева 1 м³ древесины при заданной скорости нагрева.

Указанные зависимости справедливы при условии полного поглощения СВЧ-энергии древесиной, отсутствия тепловых потерь и затрат на испарение влаги и построены по соотношению:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{P_0}{\langle C_p \rho \rangle}. \quad (18)$$

На рисунке 5 показано изменение средней температуры пластины $\langle T \rangle$ при нагреве конвективным способом и СВЧ-энергией без сушки (задавался нулевой поток пара на границах пластины). Напряженность падающего СВЧ-поля подбиралась такой, чтобы в процессе нагрева локальная температура в пластине не превышала 100 °С. Видно, что повышение температуры при СВЧ-нагреве происходит практически линейно. Время нагрева до температуры 360 К при СВЧ-нагреве полем с $E_0 = 1000$ В/м и 1500 В/м составляет $t = 2850$ с и $t = 1270$ с соответственно, что гораздо меньше, чем при конвективном нагреве, которое составило $t = 5000$ с. Время СВЧ-нагрева уменьшается пропорционально увеличению Q или E_0^2 .

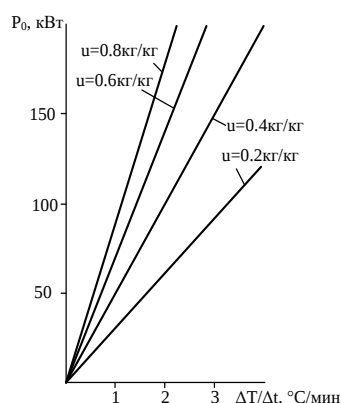


Рис. 4. Зависимость необходимой мощности СВЧ-генераторов от заданной скорости нагрева 1 м³ древесины

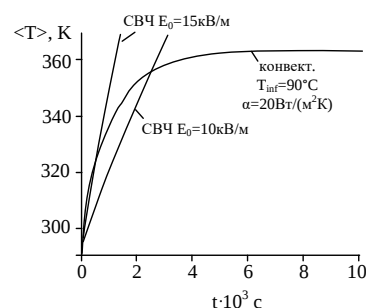


Рис. 5. Изменение средней температуры пластины при конвективном и СВЧ-нагреве

На рисунке 6 представлены результаты расчета поглощенной мощности Q СВЧ-поля, затраченной на сушку пластины от $\langle u \rangle = 0,25$ кг/кг до 0,1 кг/кг, в зависимости от коэффициента теплообмена α . Как видно, при СВЧ-сушке для снижения затрачиваемой мощности необходимо значительно уменьшать коэффициент теплообмена (например, путем создания теплоизоляции камеры сушки, исключения стоков тепла) или помещать материал на время прогрева в теплоизолирующий диэлектрический кожух.

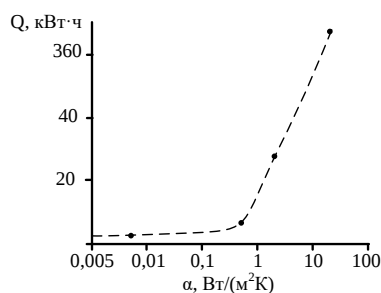


Рис. 6. Влияние коэффициента теплообмена на затрачиваемую энергию СВЧ-поля

Заключение. Выбор толщины нагреваемых пиломатериалов можно сделать в соответствии с рисунком 1, где приведен расчет глубины проникновения СВЧ-энергии частотой поля 2,45 ГГц в древесину при различном влагосодержании, температуре и ориентации вектора поля относительно волокон. Так, глубина проникновения при низких температурах нагрева меньше, чем при более высоких. Нагрев толстых сортов материалов с толщиной, большей, чем глубина проникновения, возможен при медленном начальном СВЧ-прогреве до достижения более высокой температуры, при которой глубина проникновения больше.

Наибольшую скорость имеет комбинированная сушка, совмещающая конвекционный нагрев с СВЧ-нагревом, что обеспечивает нужный градиент движения влаги и пара, направленного к границам материала, а также условия активного испарения влаги с поверхности материала теплым агентом сушки. При этом в целях экономии энергии обязательна теплоизоляция камеры сушки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Определение комплексной диэлектрической проницаемости древесины в СВЧ-диапазоне / А.Л. Адамович // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. – 2005. – № 10. – С. 37 – 43.
2. Гринчик, Н.Н. Процессы переноса в пористых средах, электролитах и мембранах. – Минск: АНК Ин-т тепломассообмена им. А.В. Лыкова АН БССР, 1991. – 251 с.
3. Моделирование процессов термовлагопереноса в капиллярно-пористых средах / С.П. Кундас, Н.Н. Гринчик, И.А. Гишкелюк, А.Л. Адамович. – Минск: Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2007. – 292 с.
4. Кречетов, И.В. Сушка древесины / И.В. Кречетов. – 3-е изд. перераб. – М.: Лесная промышленность, 1980. – 432 с.
5. Шубин, Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины / Г.С. Шубин. – Минск: Лесная промышленность, 1990. – 336 с.
6. Акулич, П.В. Термодинамические процессы в технике сушки / П.В. Акулич. – Минск: Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2002. – 268 с.

Поступила 01.03.2013

SIMULATION OF HEAT AND MOISTURE TRANSFER IN WOOD DURING MICROWAVE FINAL DRYING

A. ADAMOVICH, Y. GROZBERG, T. BULBENKOVA, O. KIZINA

The physical and mathematical model of heat and moisture transfer during the drying of materials in the field below water absorption, also taking into account the heating energy of the microwave field is developed. The numerical solution of the developed system of equations for the three cases of wood plate drying is conducted: convective energy of the microwave field and combined, combining the two previous methods. The results of the numerical calculations, which include the distribution of temperature, vapor pressure and moisture content in the cross section of the plate at different times, as well as changes in the average moisture content and temperature in the drying process, are presented. Calculation results and conclusions about the differences and characteristics of convective, microwave and combined heating and drying are analyzed.