

де: E_K – вартість енергії для камерного сушіння, грн/м³; P_{Ti} – теплова споживана потужність на i -у ступені режиму камерного сушіння, Вт; c_T – ціна теплової енергії, грн/Дж; P_E – електрична споживана потужність, Вт; c_E – ціна електричної енергії, грн/Дж; E_{KD} – вартість енергії для камерного сушіння, грн/м³; V_D – об’єм деревини в сушильній камері, м³.

Це дає змогу визначити цільову функцію

$$\Delta E(w_{II}) = E_K - E_{KD} - C_A, \quad (6)$$

та сформулювати задачу оптимізації:

$$\Delta E(w_{II}) \rightarrow \max_{w_{II}} \Rightarrow w_{IIopt}, \quad (6)$$

де: ΔE – різниця витрат на камерне та атмосферно-камерне сушіння деревини, грн/м³; w_{IIopt} – оптимальна перехідна вологість деревини.

Висновок. Розроблено методику оптимізації перехідної вологості при атмосферно-камерному сушінні деревини.

Перспективним напрямком подальших робіт є уточнення методики з урахуванням втрат деревини внаслідок вад сушіння.

Література

1. Білей П.В., Приставський Б.І. Аналіз ефективності конвективного сушіння деревини // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів: РВВ НЛТУ України. –2012. – Вип. 22.10. – С. 116-119.
2. Тепломасообмінні процеси деревообробки: підручник / Білей П.В., Петришак І.В., Соколовський І.А., Сорока Л.Я. –Львів: ЗУКЦ, 2013. – 346 с.
3. Пінчевська О.О. Сучасне лісосушильне та лісопилне устаткування / О.О.Пінчевська, З.С. Сірко, В.С. Коваль, Н.В. Марченко. – Харків: ПФ «Центр-інформ», 2005. – 176 с.
4. Павленко Ю.С. Оптимізація атмосферно-камерного сушіння деревини // Матеріали IX-го міжнародного форуму молодіж «Молодежь и сельскохозяйственная техника в XXI веке». Сборник форума. – Харьков: ХНТУСХ, 2013. – С.149.
5. Горшин С.Н. Атмосферная сушка пиломатериалов: – М.: Лесн. пром-сть, 1971. – 295 с

UDC 674.047 *Assoc. prof. S.A. Shevchenko; master's degree Yu.S. Pavlenko –
Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture*

Optimization of transient humidity during atmospheric and kiln drying of wood

The method of optimizing the transient humidity at atmospheric and kiln drying of wood, which takes into account energy costs, additional costs for salaries and rent for the land.

Keywords: wood, atmospheric drying, kiln drying.

UDC 647.047

*Assoc. prof. Yo.V. Andrashek; post-graduate
R.B. Shchupakivsky; stud. O.V. Kryvko – UNFU*

MODELING AND SIMULATION OF HEAT-AND-MASS TRANSFER IN WOOD DURING THERMAL TREATMENT IN CO₂ ENVIRONMENT

A three-dimensional mathematical model, for simultaneous heat and mass transfer taking place during the high temperature treatment of wood in carbon dioxide environment, has been developed. The mathematical description of wood modification process is derived substantially for treatment in

carbon dioxide, taking into account the peculiarities of carbonic acid using as a processing environment. Set of fundamental heat- and mass transfer mechanisms is coupled with thermodynamic phase equilibrium expressions in a way that have meaning for hygroscopic capillary-porous media. Heat transfer by both conduction and convection is included together with mass transfer by gaseous diffusion and liquid through the void space and by bound-water diffusion through the solid matrix. The equations of the model were solved numerically using the software Femlab® for the temperature and moisture content profiles. Calculated model predictions are in very satisfactory agreement with experimental results.

Keywords: high-temperature wood treatment, carbon dioxide environment, mathematical modeling, capillary-porous media, multiphase model, heat and moisture transfer.

Model development. Analysis of the physical picture of thermal modification of wood in CO₂ environment shows that process occurs while passing coupled heat and mass transfer of phenomena in local thermodynamic equilibrium of the system [1-14].

Given that thermodynamic equilibrium system is closed, any of internal processes could not influence for its preservation of the total mass. Consequently, the mass balance in the system can be described by the equation of continuity:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } J = 0, \quad (1)$$

where: J is the total mass flux vector, ρ is the material density. Because of the mass balance meets the conditions under which the amount of moisture, released from the wood, is equivalent to the value of the flux density, equation (1) can be written as:

$$-\rho_d \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial^2 J_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 J_y}{\partial y^2}, \quad (2)$$

where: J is the total mass flux vector, ρ_d is the dry wood density, and W is the water moisture content per unit mass of dry wood. The total mass flux reflects intensity of moisture removal, can be written as sum of free water, bound water, water vapor and mixture of air, carbon dioxide and organic substances respectively. The transport of free water in wood represents by Darcy's law, the bound water transfer takes place due to chemical potential gradient. The value of J_s is neglected, being that the gas present in wood is immobile with a negligible heat capacity.

Liquid water flux is given by Darcy's law at moisture contents higher than the fiber saturation point as shown below:

$$J_f = -\rho_l \frac{k_f}{\mu_l} \nabla P_c, \quad (3)$$

where: ρ_l and μ_l are the density and viscosity of the liquid water, and k_l is the permeability, P_c is the capillary pressure. The flux of bound water is assumed to be proportional to the gradient in the chemical potential of the bound molecules and to the volume fraction of space occupied by the cell wall matrix. Since thermodynamic equilibrium is assumed at every location, the chemical potential of the bound molecules is by definition equal to the chemical potential of the vapor:

$$J_b = \frac{-D_b}{m_v} \left[\frac{T}{P_v} \nabla P_v - S_v \nabla T \right], \quad (4)$$

where m_v is the molar mass of vapor, D_b the diffusion coefficient of bound water, S_v the entropy coefficient. The vapor flux can be determined as follows using Fick's law:

$$J_v = -\frac{m_v D_{eff}}{RT} \nabla P_v, \quad (5)$$

where: m_v is the molar mass of vapor, D_{eff} effective diffusivity for wood, R is the ideal gas constant, and P_v is the partial vapor pressure of water. Substituting the expressions for the fluxes of different moisture phases in Eqs. (2), the mass and energy balances can be written as:

$$\rho_d \frac{\partial W}{\partial t} = \nabla J = \nabla (A_1^1 \nabla W + A_1^2 \nabla T) ; \quad (\rho C_p) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (A_2^1 \nabla W + A_2^2 \nabla T), \quad (6)$$

where: $A_1^1 - A_2^2$ are coefficients of the equation obtained from Eq. 4-6, ρ_d is a dry wood density. However, because of chemical reactions inside the wood the density changes due to thermal treatment [1], which influence greatly for the thermodynamic properties of the material. To factor in this influences, the polynomial equation [5] was used:

$$\rho_d = \rho_0 - 1605,178 + 15,088 \cdot T - 255,716 \cdot \tau + 2,273 \cdot T\tau + 0,015 \cdot T\nu - 0,005 \cdot T^2\tau - 0,127\tau^2T - 0,002 \cdot \nu^2T - 0,003 \cdot \nu^2\tau - 0,034 \cdot T^2 + 21,476 \cdot \tau^2 + 0,010\nu^3, \quad (7)$$

where T - temperature of treatment, ν - heating rate, and τ - hold-up time at treatment temperature. Eq. 7 made it possible to show and consider the nonlinear impact of modification parameters (treatment temperature, heating rate, hold-up time) on wood density changes during heat modification in carbon dioxide.

Initial and boundary conditions. The initial conditions are given by the uniform distribution of temperature and moisture content in the wood pole at reference time zero. The boundary conditions are obtained from the heat and moisture transfer phenomena between the surfaces and edges of the poles and the external environment. The heat and mass balance at the surface requires that:

$$[\lambda \nabla T] \vec{n} = a_q \cdot (T - T_{co_2+A}) + r_0 \cdot J_n ; \quad J_n = a_m \rho_v \cdot (W - W_p), \quad (8)$$

where: λ is the effective thermal conductivity, r_0 is the latent heat of vaporization, ρ_v is the water vapour density, a_q is the heat transfer coefficient, a_m is the mass transfer coefficient, and W_p is the equilibrium moisture content. The values of convective heat and mass transfer coefficients at each point of surfaces are determined from the following expressions for turbulent flow, respectively:

$$Sh = \frac{a \cdot L}{D_{co_2+A}} = 0.664 \cdot Re^{0.5} \cdot Sc^{0.33}; \quad Nu = \frac{\alpha_m L}{\lambda} = 0.664 \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{0.33}, \quad (9)$$

where: Sh is the Sherwood number, Re is the Reynolds number, Sc is the Schmidt number, Nu is the Nusselt number, Pr is the Prandtl number and L is the length of the sample, D_{co_2+A} binary diffusion coefficient of treatment environment [4]. The other physical and transport properties were estimated using correlations from the literature [2-3]. In solving the system of Eq. 6 – 8, took into account the dependence of the thermo physical characteristics on temperature and moisture content.

Numerical solution. Equations 6 and 8 are solved numerically using the commercial package Femlab®. The problem is highly nonlinear because of the temperature and moisture content dependency. Numerical tests were conducted using different time steps and mesh sizes to verify the convergence of the model. For the experiment trials, air-dried oak wood was used. Experiments were carried out in an industrial oven Eko-AMS (Poland). The specimens were cut with dimensions of 0,032x0,12x1,5m. The samples were subjected to heat treatment at 180–220°C, under atmospheric pressure in carbon dioxide environment.

Results and discussions. The validation of the mathematical model was carried out by comparing the prediction of the model and experimental results obtained during thermal treatment in CO₂ environment. The temperature and moisture content distributions and time data for different operating condition are shown at Fig.1. – Fig.2. Comparison of results for temperature and moisture content profiles calculated by the model with those obtained from the experimental investigation has shown good agreement. The discrepancy observed between the predicted and the measured results is believed to be mainly due to the inaccurate measurements of moisture distribution in wood using gravimetric method, and indication error of thermocouples.

Conclusions. Mathematical model of high-temperature heat treatment of wood in CO₂ environment has been developed to have a better understanding of the process, and to determine its de-

pendences by treatment parameters. Femlab[®] software was used to solve the system of partial differential equations. The model predictions are in good agreement with the results of the experiments. The effects of dry wood density changes during the treatment was factored in of this study. The model can be used as an effective tool to predict moisture and temperatures distributions for the high-temperature thermal treatment of wood in carbon dioxide environment.

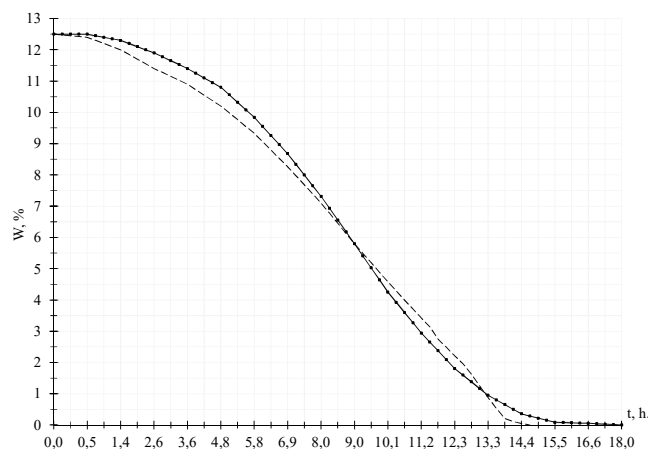


Fig. 1. – Moisture content changes of oak during the heat treatment in CO₂ environment (--- experimental data; — predicted by model)

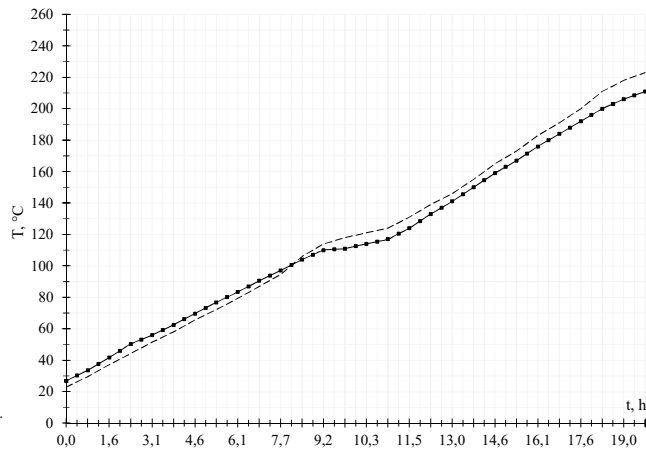


Fig. 2. – Temperature changes for middle point of oak (32x150mm) during the heat treatment in CO₂ environment (--- experimental data; — predicted by model)

As well as, this method can considerably reduce costly experimental time, and to and prevent unwanted and unforeseen consequences in the manufacturing and industrial processes. The performance of the furnace can be analyzed by changing heating schedules, initial conditions, porous media properties, ect. Model results can be incorporated into thermo-chamber control systems, providing relationships between measured values and important kiln performance parameters.

References

1. **Bekhta P., Niemz P.**, Effect of temperature on color and strength of spruce wood, *Holzforschung* 57, 2003, – P. 539-546.
2. **Siau J.F.** Transport Processes in Wood. Springer-Verlag, New York, 1984.
3. **Simpson W., Tenwold A.** Wood Handbook – wood as an engineering material. Chapter 2: Physical Properties and Moisture Relations of Wood. Forest Products Laboratory, USDA Forest Service, Madison, Wisconsin, USA, 1999. – P. 1-23.
4. **Shchupakivskyy R.**, Features of thermally modified wood in the environment of carbon dioxide, *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry / Collection of scientific and technical works*. – Lviv: UNFU. – 2011, vol. 37.1. – P. 175-179.
5. **Gayda S.V.** (2000): Матеріали для виготовлення виробів з деревини / Materials for the Production of wood Productss. Lviv: BMC. – 160 p. (in Ukr.).
6. **Gayda S.V., Maksymiv V.M., Tynytsya T.Yu.** Elaboration of post-consumer wood classifier // *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*. – Lviv. – 2008, 34:55-68. (in Ukr.).
7. **Gayda S.V., Maksymiv V.M.** Analysis, features, problems and experience of the use of additional resources of raw material – wastes and of used wood // *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*. – Lviv: NUFWT of Ukraine. – 2007, pub. 33. – P. 63-73. (in Ukr.).
8. **Gayda S.V., Maksymiv V.M.** From recycled post-consumer wood towards prime quality particleboard // *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*. – Lviv: 2010, 36:57-77.
9. **Gayda S.V.** Production techniques and properties of fuel pellets produced from post-consumer wood // *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*. – Lviv: UNFU. – 2012, 38: 112-150.
10. **Gayda S.V.** The effective use of post-consumer wood is basis for diminishing of CO₂-emission // *Scientific Herald*. – Lviv: UNFU. – 2009, 19.14:72-89. (in Ukr.).
11. **Gayda, S.** The investigation of physical and mechanical properties of wood particleboards made from post-consumer wood // *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, Lviv: UNFU. – 2011, 37.2:95-110.
12. **Gayda S.V., Voronovich V.V.** Investigation of the features of bending of post-consumer wood // *Proceedings of the Conference, Mari State University*, – 2011, 190-192 (in Russian).
13. **Gayda S.V.** Recovered wood is additional resource of raw material // *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*. – Lviv: UNFU. – 2011, 37.1:238-244. (in Ukr.).

УДК 647.047

*Доц. Й.В. Андрашек, аспір. Р.Б. Щупаківський,
студ. О.В. Кривко – НЛТУ України*

Моделювання розподілу температурних полів та полів вологості деревини у процесі термічного модифікування у вуглекислому газі

Розроблено математичну модель тепломасоперенесення у деревині при термічному модифікуванні в середовищі вуглекислого газу, що враховує вплив зміни агента обробки. Проведено чисельне моделювання та експериментальні дослідження розподілу температурних полів та полів вологості деревини при термічному обробленні у вуглекислому газі з врахуванням термодинамічних параметрів вуглекислого газу та втрати маси деревинної речовини дуба на стадії модифікування.

Ключові слова: високотемпературна обробка деревини, навколишнє середовище, вуглекислий газ, математичне моделювання, капілярно-пористі середовища, багатозфазні моделі переносу тепла і вологості.

УДК 674(04).684.667

*Доц. Л.А. Яремчук, канд. техн. наук;
магістр М.В. Іващук – НЛТУ України, Львів*

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КАНІФОЛІ НА ТОВЩИНУ ПЛІВКИ СТВОРЕНОЇ ОЛІЙНИМИ КОМПОЗИЦІЯМИ

Визначено вплив кількості модифікатора на проникність олії в деревинну дуба і сосни та товщину захисно-декоративних плівок створених модифікованими лляними оліями

Ключеві слова: лляна олія, каніфоль, дуб, сосна, товщина, проникність.

Постановка проблеми та актуальність досліджень. Деревина здавна використовується у народному господарстві як будівельний, транспортний, дорожній і побутовий вид споживчого матеріалу. За останнє століття найбільше поширення дістала деревина як матеріал для виготовлення столярно-будівельний і меблевих виробів. Захисно-декоративні покриття є одним із найважливіших складових у цілісності виготовлення виробів із деревини і деревинних матеріалів. Вони забезпечують не лише високохудожнє оформлення, але й значною мірою покращують якісні показники виробів, що дає змогу значно збільшити тривалість їх експлуатації і, у підсумку, забезпечити значну економію лісосировинних ресурсів.

Основними напрямками розвитку технології лакофарбових покриттів є: покращення декоративних і експлуатаційних властивостей покриттів за рахунок розробки нових матеріалів і методів їх нанесення та затвердіння, зниження шкідливих викидів в атмосферу при проведенні технологічних операцій, підвищення продуктивності праці, зниження питомої витрати лакофарбових матеріалів.

Створення екологічно-безпечної композиції на основі вітчизняної сировини і проведення досліджень для вирішення проблеми якісного і екологічного опорядження деревини і деревинних матеріалів на основі модифікованих вітчизняних олійних лакофарбових матеріалів є актуальною проблемою. Відомо, що покриття на основі олійних матеріалів довго висихають (до 5-7 діб), а після висихання утворюють м'яку плівку. Для прискорення плівкоутворення у олійні лакофарбові матеріали додають з'єднання деяких металів, які каталітично діють на процес за-