

Теоретический анализ процессов конвективной сушки древесины

А.Г. Гороховский^a, Е.Е. Шишкина^b, А.С. Агафонов^c, П.А. Бекк^d

Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский Тракт, 37, Екатеринбург, Россия

^a goralegr@yandex.ru, ^b elenashishkina@yandex.ru, ^c agafonovas@m.usfeu.ru, ^d bekkpa@m.usfeu.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-8847-8217>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-2584-4897>

^c <https://orcid.org/0000-0002-0955-9068>, ^d <https://orcid.org/0000-0002-0803-9124>

Статья поступила 17.01.2022, принята 16.02.2022

Сушка древесины, а точнее, пиломатериалов является одним из самых сложных и энергозатратных процессов в деревопереработке, практически полностью определяющих качество продукции, изготавливаемой из древесины. Конвективная сушка пиломатериалов во всем многообразии ее разновидностей на сегодняшний день остается самой распространенной. При компьютерном моделировании процессов сушки древесины возникает необходимость в решении системы дифференциальных уравнений теплообмена. Методы решения подобных систем достаточно глубоко изучены и проработаны — как аналитические, так и численные. Однако важнейшим методическим вопросом является корректное формулирование граничных условий, которые определяют процесс взаимосвязанного теплообмена на границе раздела фаз «древесина – влажный воздух». Для вышеупомянутой конвективной сушки традиционно использовались граничные условия III рода академика А.В. Лыкова, сформулированные им еще в начале 1950-х гг., т. е. в то время, когда только закладывались научные основы теории сушки. Позднее, уже в 1960-е гг., А.В. Лыков предложил решать систему теплообмена для случая конвективной сушки с граничными условиями IV рода. В этом случае на поверхности раздела «тело – окружающая среда» принимается равенство химических потенциалов массопереноса и соответствующих плотностей потоков массы (для случая сушки древесины — влаги). Однако, сформулировав сами граничные условия IV рода, А.В. Лыков, к сожалению, не показал путей их практического применения, в то время как ближайшее рассмотрение указывает на существенные затруднения точного формулирования ограничений. Так абсолютно неясным остается вопрос о применении введенных А.В. Лыковым коэффициентов массопроводности как самого сохнущего тела, так и среды. В рамках предложенной им классической теории сушки мы, к сожалению, не находим достаточно четкого определения вышеприведенных понятий. При этом, без четкого определения понятия массопроводности ни формулирование условий, ни, тем более, корректное решение систем дифференциальных уравнений теплообмена невозможно. Настоящая статья посвящена анализу корректного формулирования граничных условий IV рода, а также практического решения систем уравнений теплообмена, описывающих процесс конвективной сушки древесины.

Ключевые слова: сушка пиломатериалов; дифференциальные уравнения теплообмена; граничные условия.

Theoretical analysis of convective wood drying processes

A.G. Gorokhovskiy^a, E.E. Shishkina^b, A.S. Agafonov^c, P.A. Bekk^d

Ural State Forestry Engineering University; 37, Sibirsky Trakt St., Ekaterinburg, Russia

^a goralegr@yandex.ru, ^b elenashishkina@yandex.ru, ^c agafonovas@m.usfeu.ru, ^d bekkpa@m.usfeu.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-8847-8217>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-2584-4897>

^c <https://orcid.org/0000-0002-0955-9068>, ^d <https://orcid.org/0000-0002-0803-9124>

Received 17.01.2022, accepted 16.02.2022

Drying wood, namely, sawn timber, is one of the most complex and energy-consuming processes in wood processing and, moreover, almost completely determines the quality of products made from wood. Convective drying of lumber, in all its variety, remains the most widespread process today. In computer modeling of wood drying processes, it becomes necessary to solve systems of differential equations of heat and mass transfer. Methods for solving such systems have been thoroughly studied and worked out, both analytical and numerical. However, the most important methodological issue is the correct formulation of the boundary conditions that determine the process of interconnected heat and mass transfer at the phase boundary (wood - moist air). For the above-mentioned convective drying, the boundary conditions of the III kind, formulated by academician A.V. Lykov in the early 1950s, were traditionally used. That was the time when the scientific foundations of the theory of drying were just laid. Later, in the 1960s, A.V. Lykov proposed to solve the heat and mass transfer system for the case of convective drying with boundary conditions of the IV kind. In this case, on the surface of the body-environment interface, the equality of the chemical potentials of mass transfer and the corresponding densities of mass fluxes (for the case of wood drying - moisture) is assumed. However, having formulated the boundary conditions of the IV kind A.V. Lykov, unfortunately, did not show the ways of their practical application, while a closer examination shows significant difficulties in the precise formulation of restrictions. So, the question of the application of mass conductivity coefficients of the drying body itself and the medium, introduced by A.V. Lykov, is open. In the framework of the classical theory of drying proposed by the academician, unfortunately, it is not possible to find a sufficiently clear definition of the above concepts. At the same time, without a clear definition of the concept of mass conductivity, neither the formulation of conditions, nor the correct solution of systems of differential equations of heat and mass transfer is impossible. This article is devoted to the analysis of the

correct formulation of boundary conditions of the IV kind, as well as the practical solution of the systems of heat and mass transfer equations describing the process of convective wood drying.

Keywords: drying of lumber; differential equations of heat and mass transfer; boundary conditions.

Введение. При исследовании процессов переноса влаги между капиллярно-пористым телом и окружающей его средой чаще всего используется в качестве граничного условия III рода [1–6; 11–21]. В этом случае граничные условия связывают значения потенциалов переноса на поверхности тела с соответствующими потенциалами среды через заданные значения коэффициентов тепло- и влагообмена.

Так для конвективной сушки граничное условие III рода записывается для потока влаги на поверхности древесины [14]:

$$i_m = \alpha_m \rho_n (u_n - u_p), \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}, \quad (1)$$

где α_m — коэффициент влагообмена, м/с; ρ_n — плотность пара, кг/м³; u_n, u_p — соответственно влажность поверхности древесины и равновесная влажность древесины.

При этом коэффициент влагообмена может быть вычислен, например, по формуле [17]:

$$\alpha_m = \frac{0,95T}{\varphi \varepsilon} 10^{-9}, \text{ м/с}, \quad (2)$$

где T — абсолютная температура, К; φ — относительная влажность воздуха; ε — критерий фазового преобразования.

Следует отметить, что φ и T определяют равновесную влажность древесины, что также косвенно влияет как на величину α_m , так и на i_m . Поэтому достаточно сложно задать величину α_m заранее с приемлемой точностью, что делает соблюдение условия (1) проблематичным.

В то же время, А.В. Лыков показал [7; 8], что процесс переноса влаги между коллоидным капиллярно-пористым телом и окружающей его средой целесообразно анализировать при граничных условиях IV рода, когда на поверхности раздела «тело – окружающая среда» принимается равенство химических потенциалов массопереноса и соответствующих плотностей потока массы, а именно:

$$\left. \begin{aligned} \mu_m &= \mu_c \\ -\lambda_m \nabla \mu_m &= -\lambda_c \nabla \mu_c \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где μ_m, μ_c — соответственно химические потенциалы сохнущего тела и среды (на границе раздела фаз); $\lambda = \lambda_m = \lambda_c$ — коэффициент массопроводности.

Следует отметить, что практическое использование граничных условий без предварительного определения входящих в них величин невозможно.

Методика проведения исследования. Сначала необходимо сделать несколько уточнений.

1. Химические потенциалы древесины и агента сушки на поверхности древесины не обязательно равны между собой. Для того чтобы процесс сушки был возможен, необходимо, чтобы:

$$\mu_m \leq \mu_c \quad (4)$$

2. По определению:

$$\mu = RT \ln \varphi, \quad (5)$$

где R — универсальная газовая постоянная $R = 8,31$ Дж/(моль·К).

Тогда (4) можно записать как:

$$\begin{aligned} RT \ln \varphi_m &\leq RT \ln \varphi_c \\ \text{или } \varphi_c &\leq \varphi_m \end{aligned} \quad (6)$$

3. Что есть что в выражении (6).

Очевидно, что φ_c — это относительная влажность воздуха на поверхности сохнущей древесины, а φ_m — относительная влажность воздуха в капиллярах на поверхности сохнущей древесины (чтобы быть абсолютно точным, необходимо φ_m определять с учетом кривизны мениска в капилляре, т. е. с учетом закона Томпсона [2]).

4. Второе выражение в (3), по сути, определяет равенство потоков влаги в древесине и среде, т. е.:

$$i_m = i_c. \quad (7)$$

При этом согласно [7]:

$$i_m = a_m \rho_0 \nabla u, \quad (8)$$

где a_m — коэффициент влагопроводности древесины, м²/с; ρ_0 — базисная плотность древесины, кг/м³; ∇u — градиент влажности древесины (в зоне, непосредственно прилегающей к поверхности).

Соответственно:

$$i_c = -\lambda_c \nabla \mu_c, \quad (9)$$

$$\nabla \mu_c = (-RT \ln \varphi)' = \frac{RT}{\varphi} \frac{d\varphi}{dx}, \quad (10)$$

где x — координата, перпендикулярная к сохнущей поверхности.

В работе [18] коэффициент массопроводности влажного воздуха определен как:

$$\lambda_c = \frac{D_{12} MP \varphi}{(RT)^2}, \quad (11)$$

где D_{12} — коэффициент молекулярной диффузии,

м²/с; $D_{12} = D_0 \left(\frac{T}{273} \right)^n \frac{101300}{P}$; D_0 — коэффициент молярной диффузии при $T = 273$ °К, $P = 101\,300$ Па

($D_0 = 0,22 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$); P — давление, Па; M — молекулярный вес водяного пара; n — показатель степени.

Тогда (9) приобретает вид:

$$i_c = -\frac{D_{12}MP}{RT} \cdot \frac{d\varphi}{dx}, \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}. \quad (12)$$

Таким образом, выражения граничных условий (3) становятся определенными относительно известных величин. Система уравнений теплообмена, описывающая процесс конвективной сушки, может быть практически решена с граничными условиями IV рода.

Результаты исследования и их анализ. В соответствии с (3) приравняем (8) и (12):

$$\frac{D_{12}MP}{RT} \cdot \frac{d\varphi}{dx} = a_m \rho_6 \frac{du}{dx}$$

и выразим коэффициент влагопроводности древесины:

$$a_m = \frac{D_{12}MP \frac{d\varphi}{dx}}{RT \rho \frac{du}{dx}}, \text{ м}^2/\text{с}. \quad (13)$$

По выражению (13) определим расчетное значение a_m , например, для следующих условий:

1. Порода древесины — сосна ($\rho_6 = 400 \text{ кг/м}^3$);
2. Температура среды $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, $T = 273 \text{ }^\circ\text{K}$;
3. $P \approx 10^5 \text{ Па}$;
4. $M = 0,018 \text{ кг/моль}$ (вода).

Ориентировочные значения производных были определены в [2] при анализе процессов влагообмена на границе раздела фаз.

$$\text{При этом } \frac{d\varphi}{dx} \approx 0,015, \quad \frac{du}{dx} = 10 \div 12.$$

После подстановки получим:

$$a_m = 0,47 \cdot 10^{-10} \div 0,392 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}.$$

В работе [13] по приведенной диаграмме находим, что при указанной выше температуре коэффициент

влагопроводности древесины сосны составляет примерно $0,4 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$, т. е. лежит внутри диапазона (14).

Таким образом, проверка показывает, что расчетные соотношения для граничных условий IV рода, полученные нами аналитическим путем, дают приемлемую точность вычислений.

Практическое решение систем уравнений теплообмена при анализе сушки различных пород древесины различными режимами [10; 14] показал, что решение систем теплообмена с граничными условиями III и IV рода дает сопоставимые результаты. Расхождение в определении продолжительности сушки не превышает 1–2 %.

Выводы

1. Одним из эффективных инструментов компьютерного анализа процессов сушки древесины является решение системы дифференциальных уравнений теплообмена, предложенной академиком А.В. Лыковым. Для случая конвективной сушки древесины указанную систему решают с граничными условиями III рода. Однако, по мнению самого основоположника теории сушки А.В. Лыкова, методически правильно было бы решать данную систему с граничными условиями IV рода, которые предполагают на границе раздела фаз равенство химических потенциалов массопереноса и соответствующих плотностей потоков массы.

2. Применение граничных условий IV рода для решения системы теплообмена сопряжено с трудностями практической реализации по причине неопределенности ряда понятий и их математического выражения через известные величины. Одним из таких вновь вводимых коэффициентов является так называемый коэффициент массопроводности влажного воздуха λ_c .

3. Решение идентичных систем уравнений теплообмена с граничными условиями III и IV рода дает вполне сопоставимые результаты. Расхождение в определении продолжительности сушки составляет не более 2 %.

Литература

1. Веретельник Т.И. Математическая модель неізотермического массопереноса в пористых средах // Вісн. Сумського державного ун-ту. Сер. Технічні науки. 2003. № 12 (58). С. 153-158.
2. Гороховский А.Г. Технология сушки пиломатериалов на основе моделирования и оптимизации процессов теплообмена в древесине: дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2008. 290 с.
3. Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е. Анализ динамики процессов сушки древесины с применением вычислительной среды Mathcad - 12 // Деревообрабатывающая пром-сть. 2007. № 5. С. 18-20.
4. Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Чернышев О.Н. Повышение точности решения задачи теплообмена при анализе процесса сушки капиллярно-пористого тела // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-1. С. 218.
5. Гринчик Н.Н., Акулич П.В., Куц П.С., Павлюкевич Н.В., Терехов В.И. К проблеме неізотермического массопереноса в пористых средах // Инженерно-физический журнал. 2003. Т. 76. № 6. С. 129-141.
6. Гринчик Н.Н., Гишкелюк И.А., Кундас С.П. Моделирование теплообмена и поверхностных явлений в капиллярно-пористых средах на основе уравнений двухфазной фильтрации и изотерм сорбции // Современная наука. 2011. № 2 (7). С. 146-150.
7. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 470 с.
8. Лыков А.В. О системах дифференциальных уравнений теплообмена в капиллярнопористых телах // Инженерно-физический журнал. 1974. Т. XXVI. № 1. С. 18-25.
9. Никитина Л.М. Термодинамические параметры и коэффициенты массопереноса во влажных материалах. М.: Энергия, 1968. 500 с.
10. Смирнов В.С. О краевых условиях для преобразованной системы дифференциальных уравнений сушки // Инженерно-физический журнал. 1962. Т. V. № 3. С. 88-94.
11. Старова Е.В. Технология сушки пиломатериалов режимами оптимизированной структуры: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2018. 163 с.

12. Шишкина Е.Е. Энергосберегающая технология конвективной сушки пиломатериалов на основе управляемого влагопереноса в древесине: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 2016. 40 с.
13. Шубин Г.С., Щедрина Э.Б. Влагопроводность древесины при отрицательной температуре // Деревообрабатывающая пром-сть. 1971. № 10. С. 13-16.
14. Шубин Г.С. Обобщенная система уравнений тепло-массо-переноса при переменных условиях среды и ее реализация на ЭВМ для расчета процессов сушки древесины // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 1988. № 3. С. 49-56.
15. Azzouz S., Dhib K.B., Bahar R., Ouertani S., Elaieb M.T., Elcafsi A. Mass Diffusivity of Different Species of Wood in Convective Drying // European Journal of Wood and Wood Products. 2018. V. 76, iss. 2. P. 573-582.
16. Da Silva W.P., da Silva L.D., e Silva C.M.D.P.S., Nascimento P.L. Optimization and Simulation of Drying Processes Using Diffusion Models: Application to Wood Drying Using Forced Air at Low Temperature. Wood Science and Technology. 2011. V. 45, iss. 4. P. 787-800.
17. Da Silva W.P., e Silva C.M.D.P.S., Rodrigues A.F., de Figueirêdo R.M. F. One-Dimensional Numerical Solution of the Diffusion Equation to Describe Wood Drying: Comparison with Two- and Three-Dimensional Solutions // Journal of Wood Science. 2015. V. 61, iss. 4. P. 364-371.
18. Moises S.A., Pereira S. do L. Dealing with Empty and Overabundant Answers to Flexible Queries // Journal of Data Analysis and Information Processing. 2014. V. 2. № 1. P. 12-18.
19. Nakagawa K., Tamura A., Adachi S. Optimization of Food Dye (Betanin) Retention during Hot Air Drying: Design Space Calculation with Consideration of Reaction and Substrate Transfer Kinetics. Drying Technology. 2018. V. 36, iss. 15. P. 1920-1929.
20. Obataya E., Higashihara T. Reversible and Irreversible Dimensional Changes of Heat-Treated Wood during Alternate Wetting and Drying. Wood Science and Technology. 2017. V. 51, iss. 4. P. 739-749.
21. Safin R.R., Khasanshin R.R., Khakimzyanov I.F., Mukhametzyanov Sh.R., Kainov P.A. Increasing the Energy Efficiency of the Process of Oscillating Vacuum-Conductive Drying of Wood by Means of a Heat Pump // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2017. V. 90, iss. 2. P. 310-317.
6. Grinchik N.N., Gishkelyuk I.A., Kundas S.P. Modelling of Heat and Mass Transfer and Surface Phenomena in Capillaryporous Media Based on Equations of Two-Phase Filtration and Sorption Isotherms // Modern Science: Researches, Ideas, Results, Technologies. 2011. № 2 (7). P. 146-150.
7. Lykov A.V. Drying Theory. M.: Energiya, 1968. 470 p.
8. Lykov A.V. On Systems of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies // Journal of Engineering Physics. 1974. V. HKHVI. № 1. P. 18-25.
9. Nikitina L.M. Thermodynamic parameters and mass transfer coefficients in wet materials. M.: Energiya, 1968. 500 p.
10. Smirnov V.S. On the boundary conditions for the transformed system of differential equations drying // Journal of Engineering Physics. 1962. V. V. № 3. P. 88-94.
11. Starova E.V. Lumber drying technology with optimized structure modes: dis. ... kand. tekhn. nauk. Ekaterinburg, 2018. 163 p.
12. SHishkina E.E. Energy-Saving Technology for Convective Drying of Sawn Timber Based on Controlled Moisture Transfer in Wood: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk. Arhangel'sk, 2016. 40 p.
13. SHubin G.S., SHCHedrina E.B. Moisture conductivity of wood at sub-zero temperatures // Derevoobrabativaushaya promishlennost' (Woodworking industry). 1971. № 10. P. 13-16.
14. SHubin G.S. Generalized System of Heat and Mass Transfer Equations under Variable Environmental Conditions and Its Implementation on a Computer for Calculating the Drying Processes of Wood // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 1988. № 3. P. 49-56.
15. Azzouz S., Dhib K.B., Bahar R., Ouertani S., Elaieb M.T., Elcafsi A. Mass Diffusivity of Different Species of Wood in Convective Drying // European Journal of Wood and Wood Products. 2018. V. 76, iss. 2. P. 573-582.
16. Da Silva W.P., da Silva L.D., e Silva C.M.D.P.S., Nascimento P.L. Optimization and Simulation of Drying Processes Using Diffusion Models: Application to Wood Drying Using Forced Air at Low Temperature. Wood Science and Technology. 2011. V. 45, iss. 4. P. 787-800.
17. Da Silva W.P., e Silva C.M.D.P.S., Rodrigues A.F., de Figueirêdo R.M. F. One-Dimensional Numerical Solution of the Diffusion Equation to Describe Wood Drying: Comparison with Two- and Three-Dimensional Solutions // Journal of Wood Science. 2015. V. 61, iss. 4. P. 364-371.
18. Moises S.A., Pereira S. do L. Dealing with Empty and Overabundant Answers to Flexible Queries // Journal of Data Analysis and Information Processing. 2014. V. 2. № 1. P. 12-18.
19. Nakagawa K., Tamura A., Adachi S. Optimization of Food Dye (Betanin) Retention during Hot Air Drying: Design Space Calculation with Consideration of Reaction and Substrate Transfer Kinetics. Drying Technology. 2018. V. 36, iss. 15. P. 1920-1929.
20. Obataya E., Higashihara T. Reversible and Irreversible Dimensional Changes of Heat-Treated Wood during Alternate Wetting and Drying. Wood Science and Technology. 2017. V. 51, iss. 4. P. 739-749.
21. Safin R.R., Khasanshin R.R., Khakimzyanov I.F., Mukhametzyanov Sh.R., Kainov P.A. Increasing the Energy Efficiency of the Process of Oscillating Vacuum-Conductive Drying of Wood by Means of a Heat Pump // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2017. V. 90, iss. 2. P. 310-317.

References

1. Veretel'nik T.I. Mathematical Model of Non-Isothermal Mass Transfer in Porous Media // Visn. Sums'kogo derzhavnogo un-tu. Ser. Tekhnichni nauki. 2003. № 12 (58). P. 153-158.
2. Gorohovskij A.G. Sawn Timber Drying Technology Based on Modeling and Optimization of Heat and Mass Transfer Processes in Wood: dis. ... d-ra tekhn. nauk. Ekaterinburg, 2008. 290 p.
3. Gorohovskij A.G., SHishkina E.E. Analysis of the dynamics of wood drying processes using the computing environment Mathcad - 12 // Derevoobrativaushaya promishlennost' (Woodworking industry). 2007. № 5. P. 18-20.
4. Gorohovskij A.G., SHishkina E.E., CHernyshev O.N. Increasing the accuracy of solving the problem of heat and mass transfer in the analysis of the drying process of a capillary-porous body // Modern problems of science and education. 2015. № 2-1. P. 218.
5. Grinchik N.N., Akulich P.V., Kuc P.S., Pavlyukevich N.V., Terekhov V.I. On the Problem of Nonisothermal // Journal of Engineering Physics. 2003. V. 76. № 6. P. 129-141.
19. Nakagawa K., Tamura A., Adachi S. Optimization of Food Dye (Betanin) Retention during Hot Air Drying: Design Space Calculation with Consideration of Reaction and Substrate Transfer Kinetics. Drying Technology. 2018. V. 36, iss. 15. P. 1920-1929.
20. Obataya E., Higashihara T. Reversible and Irreversible Dimensional Changes of Heat-Treated Wood during Alternate Wetting and Drying. Wood Science and Technology. 2017. V. 51, iss. 4. P. 739-749.
21. Safin R.R., Khasanshin R.R., Khakimzyanov I.F., Mukhametzyanov Sh.R., Kainov P.A. Increasing the Energy Efficiency of the Process of Oscillating Vacuum-Conductive Drying of Wood by Means of a Heat Pump // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2017. V. 90, iss. 2. P. 310-317.