

УДК 674.047.3

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-166-172

КОНВЕКТИВНАЯ СУШКА ПИЛОМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЯЕМОГО ВЛАГООБМЕНА

*А.Г. Гороховский, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [O-6030-2018](https://orcid.org/0000-0001-8847-8217),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8847-8217>*

*Е.Е. Шишкина, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [O-6021-2018](https://orcid.org/0000-0002-2584-4897),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2584-4897>*

*А.С. Агафонов, аспирант; ResearcherID: [ABD-5832-2021](https://orcid.org/0000-0002-0955-9068),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0955-9068>*

Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37,
г. Екатеринбург, Россия, 620100; e-mail: goralegr@yandex.ru, elenashishkina@yandex.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 25.05.21 / Принята к печати 19.08.21

Аннотация. Сушка древесины, в частности пиломатериалов, является одним из самых сложных и энергозатратных процессов в деревопереработке, практически полностью определяющим качество продукции, изготовляемой из древесины. Конвективная сушка пиломатериалов, во всем многообразии ее разновидностей, на сегодняшний день остается самой распространенной. Компьютерное моделирование процессов сушки древесины обычно проводится на основе решения систем, дифференциальных уравнений тепломассообмена. Методы решения подобных систем, как аналитические, так и численные, достаточно глубоко изучены и проработаны. Однако важнейшим методическим вопросом является корректное формулирование граничных условий, которые определяют процесс взаимосвязанного тепломассообмена на границе раздела фаз (древесина – влажный воздух). Для конвективной сушки традиционно использовались граничные условия III рода академика А.В. Лыкова, для которых характерно достаточно близкое соответствие потоков массы, движущейся из глубины древесины и на границе раздела фаз. Данное соответствие характеризуется величиной так называемого массообменного критерия Био. Для проверки высказанных предположений был проведен вычислительный эксперимент, позволивший определить возможную управляемость процесса влагоудаления при низкотемпературной конвективной сушке условного пиломатериала режимами трех- и бесступенчатой структуры. Помимо этого исследовалось влияние процесса влагоудаления на динамику внутренних напряжений в древесине. Результаты показали, что бесступенчатые режимы, с одной стороны, обеспечивают существенное повышение качества сушки практически без потери производительности лесосушильных камер, а с другой стороны, обладают более высокой управляемостью. Результаты ранее проведенных исследований позволили предложить общие принципы, а затем запатентовать коренным образом отличающуюся от ранее известных систем управления сушкой древесины систему автоматического управления влагообменом при сушке древесины. Данная система управляет процессом сушки за счет регулирования соотношения внешнего и внутреннего влагообмена, а не величины параметров среды в камере. Система управления влагообменом при конвективной сушке пиломатериалов является ограниченно управляющей: полностью стабилизировать значения массообменного критерия Био она не позволяет. Однако ее применение поддерживает определенный баланс между внутренним и внешним влагообменом, обеспечивает требуемое качество сушки и практически полностью исключает возникновение брака.

Данная статья опубликована в режиме открытого доступа и распространяется на условиях лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (CC BY 4.0) • Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Для цитирования: Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Агафонов А.С. Конвективная сушка пиломатериалов на основе управляемого влагообмена // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 1. С. 166–172. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-166-172

Ключевые слова: система управления сушкой, влагообмен, конвективная сушка пиломатериалов, массообменный критерий Био.

LUMBER CONVECTIVE DRYING BASED ON CONTROLLED MOISTURE TRANSFER

Alexandr G. Gorokhovskiy, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: O-6030-2018,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8847-8217>

Elena E. Shishkina, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: O-6021-2018,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2584-4897>

Artem S. Agafonov, Postgraduate Student; ResearcherID: ABD-5832-2021,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0955-9068>

Ural State Forest Engineering University, ul. Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; e-mail: goralegr@yandex.ru, elenashishkina@yandex.ru

Original article / Received on May 25, 2021 / Accepted on August 19, 2021

Abstract. Wood drying (in particular lumber drying), which almost entirely determines the quality of the wooden products, is one of the most complicated and energy-consuming processes in wood processing. Convective drying of lumber, in all its varieties, remains the most common by far. Computer modeling of wood drying processes is usually based on solving systems of differential heat and mass transfer equations. The methods for solving such systems, both analytical and numerical, are well researched and developed. However, the most important methodological issue is the correct formulation of the boundary conditions that determine the process of interrelated heat and mass transfer at the interface (wood – moist air). The convective drying has traditionally used the boundary conditions of type III by Academician A.V. Lykov, which are characterized by a sufficiently close correspondence between the mass flows moving from the wood depth and at the interface. This correspondence is described by the value of the so-called Bio mass transfer criterion. A computational experiment was carried out to verify these assumptions. It enabled to determine the possible controllability of the moisture removal during low-temperature convective drying of conventional lumber using modes of three-step and stepless structure. Besides this, the influence of the moisture removal on the dynamics of the internal stresses in wood was also studied. The results have shown that the stepless drying modes, on the one hand, offer a significant improvement in drying quality with practically no loss of drying capacity, and on the other hand, have better controllability. The results of the previously conducted and mentioned studies made it possible to propose general principles and then to patent a system for automatic control of moisture transfer during wood drying, which is fundamentally different from the previously known wood drying control systems. The system controls the drying process by adjusting the ratio of external to internal moisture transfer, rather than the value of the media parameters in the chamber. The moisture transfer control system for convective drying of lumber is of limited control: it cannot fully stabilize the values of the Bio mass transfer criterion. However, its use maintains a certain balance between internal and external moisture transfer, ensures the required drying quality and almost completely eliminates the occurrence of defects.

For citation: Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E., Agafonov A.S. Lumber Convective Drying Based on Controlled Moisture Transfer. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 1, pp. 166–172. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-166-172

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license • The authors declare that there is no conflict of interest

Keywords: drying control system, moisture transfer, lumber convective drying, Bio mass transfer criterion.

Введение

Для теоретического анализа процессов низкотемпературной конвективной сушки древесины обычно используют систему уравнений теплообмена, предложенную А.В. Лыковым [9],

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{\varepsilon r_{\phi} a_m}{c} \nabla^2 u; \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 u + a_m \delta \nabla^2 t, \quad (2)$$

где t – температура, °С; τ – время, с; a – коэффициент температуропроводности древесины, м²/с; ε – критерий фазового превращения; r_{ϕ} – теплота парообразования, Дж/кг; a_m – коэффициент влагопроводности древесины, м²/с; c – теплоемкость древесины, Дж/кг·град; u – влажность.

При этом чаще всего заданную систему решают с граничными условиями III рода [5–9, 16–22], которые для неограниченной пластины (доска) выглядят следующим образом:

$$-\lambda \frac{\partial t(R, \tau)}{\partial x} + \alpha [t_c - t(R, \tau)] - (1 - \varepsilon) \rho_{\phi} r_{\phi} \alpha_m [u(R, \tau) - u_p] = 0; \quad (3)$$

$$a_m \frac{\partial u(R, \tau)}{\partial x} + a_m \delta \frac{\partial t(R, \tau)}{\partial x} + \alpha_m [u(R, \tau) - u_p] = 0, \quad (4)$$

где λ – коэффициент теплопроводности древесины, Вт/м²·град; α – коэффициент теплообмена, Вт/м²·град; R – половина толщины доски, м; x – координата, м; ρ_{ϕ} – базисная плотность древесины, кг/м³; α_m – коэффициент влагообмена, м/с; u_p – равновесная влажность древесины.

Процесс сушки считается близким к оптимальному [8] при условии, что потоки влаги – идущий из глубины сортамента i_{am} и испаряющийся с поверхности древесины $i_{\alpha m}$ – равны (или достаточно близки) между собой [9]:

$$i_{am} = -a_m \rho_{\phi} \nabla u;$$

$$i_{\alpha m} = \alpha_m \rho_{\phi} (u_n - u_p),$$

где u_n – влажность поверхности древесины.

Ясно, что их практическое равенство возможно лишь при вполне определенном отношении коэффициента влагообмена к коэффициенту влагопроводности, которое определяется величиной массообменного критерия Био [9]:

$$Bi_m = \frac{\alpha_m}{a_m} R.$$

Очевидно, что, варьируя величины α_m и a_m в ходе сушки, мы имеем возможность сделать процесс влагоудаления в известной степени управляемым.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования была использована модель процесса низкотемпературной сушки пиломатериалов на основе системы дифференци-

альных уравнений тепломассообмена (1), (2) с граничными условиями (3), (4). Реализация вычислительного эксперимента для сушки условного пиломатериала режимами трех и бесступенчатой структуры [3] проводилась в среде Mathcad [14]. Для анализа возможной управляемости процесса сушки определялось значение Bi_m , а также влажностные напряжения в процессе сушки на многостержневой модели доски Б.Н. Уголева [14].

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты вычислительного эксперимента приведены в таблице.

Расчетные параметры исследованных режимов сушки

Тип режима	Bi_m		Конечная влажность древесины, %			Максимальное влажностное напряжение, МПа
	максимальное	минимальное	максимальная	минимальная	средняя	
Трехступенчатый	38	20	10	6	8	3,2
Бесступенчатый	17	12	9	7	8	1,9

Особенности тепломассообмена для трех- и бесступенчатой структур режима были проанализированы в [4]. В дополнение к сказанному ранее можно отметить следующее.

1. Бесступенчатый режим обладает существенно бóльшим потенциалом управляемости. Так, для него $\frac{Bi_m \max}{Bi_m \min} \approx 1,4$, в то время как для трехступенчатого $\frac{Bi_m \max}{Bi_m \min} \approx 1,9$.

2. Бесступенчатый режим обеспечивает значительно более высокое качество сушки. При этом меньше перепад влажности по толщине доски и внутренние напряжения в древесине.

3. Плавное изменение параметров режима вследствие отсутствия ступеней сушки позволяет обеспечить также плавное течение переходных процессов и ставить вопрос о реальной возможности создания системы автоматического управления сушкой.

4. На основе комплекса проведенных исследований [13] нами предложены принципы управления сушкой [11], а затем и принципы построения системы управления влагообменом при сушке пиломатериалов. Необходимо отметить, что данные вопросы оказывались в поле зрения многих авторов [1, 2, 4, 10, 12, 15], однако разработанные ими системы, как правило, управляли параметрами среды в сушильной камере, а не собственно процессом сушки за счет регулирования соотношения внутреннего и внешнего влагообмена.

На рисунке [14] приведена структурная схема системы управления процессом влагоудаления при конвективной сушке пиломатериалов.

Выходные параметры системы: влажность сохнувшего сортамента древесины (u); температура древесины ($t_{др}$); градиент температуры по сечению доски (Δt) [11].

Система охвачена двумя контурами обратной связи: по параметрам переноса влаги в древесине и по параметрам влагообмена древесины со средой.



Структурная схема системы управления сушкой

Block diagram of the drying control system

Важно, что управляющим является второй контур обратной связи. Управление величиной критерия Био производится путем регулирования параметров среды: температуры воздуха и его относительной влажности.

Использование системы управления влагообменом [4, 15] позволяет определять параметры режима непосредственно в процессе сушки и получать пиломатериалы заданной категории качества в зависимости от требований потребителя.

Выводы

1. Система управления влагообменом при конвективной сушке является ограниченно управляющей, т. к. полностью стабилизировать массообменный критерий Био она не позволяет.

2. Система дает возможность поддерживать определенный баланс между внутренним и внешним влагообменом сохнущего сортимента древесины, тем самым обеспечивая требуемое качество сушки и практически полностью исключая вероятность возникновения брака. Постоянный мониторинг текущей влажности древесины гарантирует необходимую конечную влажность.

3. Принципиальной особенностью системы является возможность непрерывного контроля градиента температуры по сечению сортимента, что позволяет при необходимости корректировать параметры среды по критерию фазового перехода и термоградиентному коэффициенту.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Агапов В.П. Автоматизация управления процессом сушки по психрометрической разности // Сушка древесины: материалы всесоюз. науч.-техн. совещ. Архангельск: ЦНИИМОД, 1975. С. 24–27. Agapov V.P. Automation of Drying Process Control by Psychrometric Difference. *Drying of Wood: Proceedings of the All-Union Scientific and Technical Meeting*. Arkhangelsk, TsNIIMOD Publ., 1975, pp. 24–27.

2. Богданов Е.С. Автоматизация процессов сушки пиломатериалов. М.: Лесн. пром-сть. 1979. 175 с. Bogdanov E.S. *Automation of Lumber Drying Processes*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1979. 175 p.

3. Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е. Особенности тепломассообмена при сушке пиломатериалов бесступенчатыми режимами // Хвойные бореальной зоны. 2019. Т. 37, № 2. С. 139–143. Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E. Features of Heat and Mass Transfer at Drying of Timber by Stepless Modes. *Hvoynye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2019, vol. 37, no. 2, pp. 139–143.

4. Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Гороховский А.А. Режимы конвективной сушки пиломатериалов: оптимизация структуры и величин технологических параметров // Деревообработ. пром-сть. 2010. № 4. С. 14–16. Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E., Gorokhovskiy A.A. Modes of Convective Drying of Lumber: Optimization of the Structure and Values of Technological Parameters. *Derevoobrabatival'naya promyshlennost'* [Woodworking industry], 2010, no. 4, pp. 14–16.

5. Гринчик Н.Н., Гишкелюк И.А., Кундас С.П. Моделирование тепломассопереноса и поверхностных явлений в капиллярно-пористых средах на основе уравнений двухфазной фильтрации и изотерм сорбции // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2011. № 2(7). С. 146–150. 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. *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii* [Modern Science: Researches, Ideas, Results, Technologies], 2011, no. 2(7), pp. 146–150.

6. Гринчик Н.Н., Акулич П.В., Куц П.С., Павлюкевич Н.В., Терехов В.И. К проблеме неизотермического массопереноса в пористых средах // Инж.-физ. журн. 2003. Т. 76, № 6. С. 129–141. Grinchik N.N., Akulich P.V., Kuts P.S., Pavlyukevich N.V., Terekhov V.I. On the Problem of Nonisothermal Mass Transfer in Porous Media. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics], 2003, vol. 76, no. 6, pp. 129–141. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:JOEP.0000012041.81528.02>

7. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высш. шк., 2001. 550 с. Kartashov E.M. *Analytical Methods in the Theory of Thermal Conductivity of Solids*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001. 550 p.

8. Кудинов В.А., Карташов Э.М., Калашников В.В. Аналитические решения задач тепломассопереноса и термоупругости для многослойных конструкций. М.: Высш. шк., 2005. 432 с. Kudinov V.A., Kartashov E.M., Kalashnikov V.V. *Analytical Solutions for Problems of Heat and Mass Transfer and Thermoelasticity for Multilayer Structures*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2005. 432 p.

9. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 470 с. Lykov A.V. *Drying Theory*. Moscow, Energiya Publ., 1968. 470 p.

10. Морозов В.М. Автоматизация сушки пиломатериалов как фактор экономного расходования тепловой и электрической энергии // Рациональное использование энергетических ресурсов при сушке пиломатериалов. Саласпилс, 1983. С. 32–36. Morozov V.M. *Automation of Lumber Drying as a Factor of Economical Consumption of Heat and Electric Energy. Rational Use of Energy Resources in Drying Lumber*. Salaspils, 1983, pp. 32–36.

11. Патент 2638229 С2 РФ, МПК F26B 3/04, F26B 21/12. Способ сушки пиломатериалов: № 2015140179: заявл. 21.09.2015; опубл. 12.12.2017 / А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина, Е.В. Сливина. Gorokhovskij A.G., Shishkina E.E., Slivina E.V. *Method for Drying Lumber*. Patent RF no. RU 2638229 C2, 2017.

12. Савенко В.Г., Савенко А.В., Петрухин Ю.П. Повышение эффективности системы управления процессом сушки пиломатериалов // Деревообработ. пром-сть. 2004. № 4. С. 15–17. Savenko V.G., Savenko A.V., Petrukhin Yu.P. Improving the Control System Efficiency of the Lumber Drying Process. *Derevoobrabatival'naya promyshlennost'* [Woodworking industry], 2004, no. 4, pp. 15–17.

13. Старова Е.В. Технология сушки пиломатериалов режимами оптимизированной структуры: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2018. 163 с. Starova E.V. *Lumber Drying Technology with Optimized Structure Modes*: Cand. Eng. Sci. Diss. Yekaterinburg, 2018. 163 p.
14. Шишкина Е.Е. Энергосберегающая технология конвективной сушки пиломатериалов на основе управляемого влагопереноса в древесине: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск: САФУ, 2016. 40 с. Shishkina E.E. *Energy-Saving Technology for Convective Drying of Lumber Based on Controlled Moisture Transfer in Wood*: Dr. Eng. Sci. Diss. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2016. 40 p.
15. Шишкина Е.Е., Гороховский А.Г. Оптимизация структуры и величины параметров режимов конвективной сушки пиломатериалов по показателям эффективности и качества // Изв. СПбЛТА. 2015. Вып. 213. С. 232–241. Shishkina E.E., Gorokhovskiy A.G. Optimization of the Structure and Size of the Parameters Modes of Convective Drying Lumber in terms of Efficiency and Quality. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2015, iss. 213, pp. 232–241.
16. Azzouz S., Ben Dhib K., 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, vol. 76, iss. 2, pp. 573–582. DOI: [10.1007/s00107-017-1212-9](https://doi.org/10.1007/s00107-017-1212-9)
17. 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, vol. 45, iss. 4, pp. 787–800. DOI: [10.1007/s00226-010-0391-x](https://doi.org/10.1007/s00226-010-0391-x)
18. 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, vol. 61, iss. 4, pp. 364–371. DOI: [10.1007/s10086-015-1479-6](https://doi.org/10.1007/s10086-015-1479-6)
19. Moises S.A., Pereira S.L. Dealing with Empty and Overabundant Answers to Flexible Queries. *Journal of Data Analysis and Information Processing*, 2014, vol. 2, no. 1, pp. 12–18. DOI: [10.4236/jdaip.2014.21003](https://doi.org/10.4236/jdaip.2014.21003)
20. 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, vol. 36, iss. 15, pp. 1920–1929. DOI: [10.1080/07373937.2018.1463538](https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1463538)
21. Obataya E., Higashihara T. Reversible and Irreversible Dimensional Changes of Heat-Treated Wood during Alternate Wetting and Drying. *Wood Science and Technology*, 2017, vol. 51, iss. 4, pp. 739–749. DOI: [10.1007/s00226-017-0918-5](https://doi.org/10.1007/s00226-017-0918-5)
22. Safin R.R., Khasanshin R.R., Khakimzyanov I.F., Mukhametzhanov 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, vol. 90, iss. 2, pp. 310–317. DOI: [10.1007/s10891-017-1569-y](https://doi.org/10.1007/s10891-017-1569-y)