

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЛАГОПРОВОДНОСТИ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СУШКЕ ДРЕВЕСИНЫ

И.В. САПОЖНИКОВ, доц., МГУЛ, канд. техн. наук⁽¹⁾,

Н.В. СКУРАТОВ, проф., МГУЛ, канд. техн. наук⁽¹⁾,

И.И. АЛЕКСЕЕВА, асп. МГУЛ⁽¹⁾,

Д.А. САМОЙЛЕНКО, асп. МГУЛ⁽¹⁾,

М.П. МАМОНТОВ, магистрант МГУЛ⁽¹⁾,

К.А. МАТВЕЕВА, магистрант МГУЛ⁽¹⁾

gosha@mgul.ac.ru, skuratov@mgul.ac.ru, alexeeva@mgul.ac.ru, samoylenko@mgul.ac.ru,
mamontov@mgul.ac.ru, matveeva@mgul.ac.ru

⁽¹⁾ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса»
141005, Московская обл., г. Мытищи-5, ул. 1-я Институтская, д. 1, МГУЛ

Особенности конвективной сушки древесины определяются, в основном, характером переноса воды. Внутреннее сопротивление переносу в древесине зависит от ее строения, температуры, влажности, направления потока воды и может характеризоваться коэффициентом влагопроводности. В данной работе эти коэффициенты определялись путем решения обратной задачи для уравнения влагопроводности. Распределения влажности в древесине определялись в процессе сушки методом послойной влажности, а также рентгеноскопии. После обработки результатов определения послойной влажности получена зависимость коэффициента влагопроводности древесины березы в радиальном направлении при температуре 65°C. Поля влажности в небольших образцах из древесины осины и сосны при их сушке в комнатных условиях были получены методом спектроскопии. Однако полученные данные позволили рассчитывать лишь средние значения коэффициентов влагопроводности в радиальном направлении. Они оказались равными $1,64 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ и $1,94 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ для древесины осины и сосны соответственно.

Ключевые слова: сушка древесины, влажность, послойный метод, рентгеноскопия, коэффициент влагопроводности.

Сушка древесины является важнейшим технологическим процессом в деревообработке, во многом определяющим качество изготавливаемой из древесины продукции. Режимы наиболее распространенной конвективной сушки древесины определяются, главным образом, особенностями переноса влаги. При низкотемпературной сушке перемещение воды в древесине осуществляется, в основном, в жидкой фазе и носит градиентный характер [1]. Перенос влаги в древесине является сложным физическим процессом, что и обуславливает зависимость коэффициента влагопроводности от многих факторов. К ним относятся, в первую очередь, направление потока, температура, плотность и влагосодержание древесины.

В научной литературе имеется достаточно большое количество аналитических зависимостей коэффициента влагопроводности различных пород древесины, обобщающие данные прямых и косвенных экспериментов как для стационарных [2–5], так и для нестационарных процессов переноса влаги [6–9].

Позднее появились методы определения коэффициентов влагопроводности, основанные на решении обратной коэффициентной задачи для уравнения влагопроводности [10–14].

Полученные разными исследователями данные по коэффициентам влагопроводности древесины для одних и тех же пород, как правило, заметно отличаются друг от друга. По-видимому, это связано с различием используемых методик и свойств экспериментальных образцов древесины.

При современном развитии вычислительной техники и численной математики достоверность расчетов математической модели определяется, в основном, точностью коэффициентов, входящих в модель. Поэтому надежные экспериментальные методы определения коэффициентов влагопроводности древесины по-прежнему остаются актуальными. Это в полной мере относится и к неразрушающим методам, реализация которых максимально приближена к условиям реальных процессов сушки.

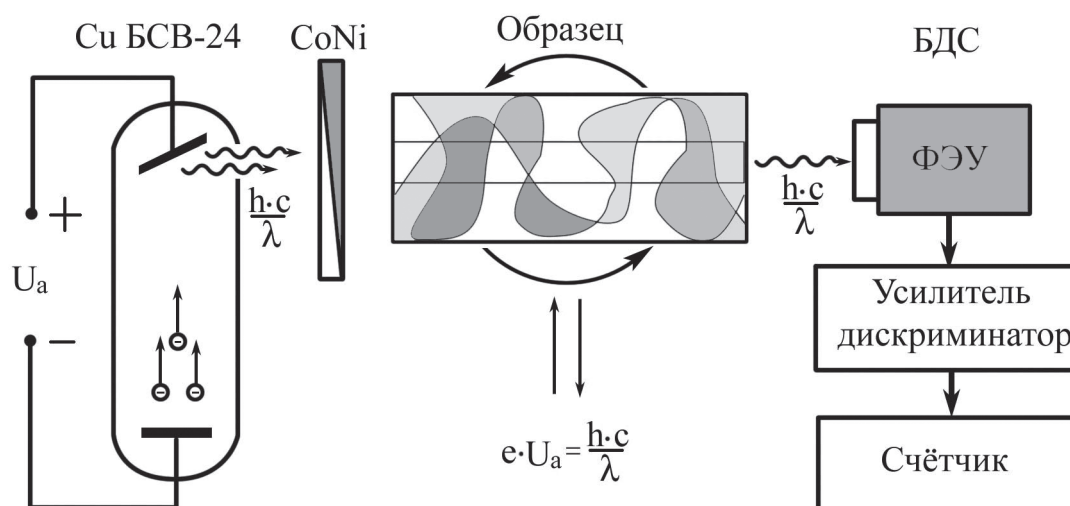


Рис. 1. Схема измерительного стенда для измерения локальной влажности в древесине и в материалах на ее основе

Fig. 1. The measuring bench scheme to measure local humidity in wood and wood-based materials

Цель данной работы состояла в определении коэффициентов влагопроводности по полученным на различных этапах сушки распределениям влажности в образцах древесины классическим весовым способом и неразрушающим методом рентгеноскопии.

Для определения послойной влажности в ходе конвективной сушки весовым способом из сырой древесины березы с базисной плотностью 510 кг/м^3 было подготовлено шесть образцов размером $8 \times 70 \times 800 \text{ мм}$. Для предотвращения испарения воды с торцов и кромок образцов они покрывались силиконом. Экспериментальные сушки проводились в лабораторной сушильной камере при температуре 65°C , относительной влажности 60% и скорости движения воздуха 2 м/с . При проведении опытной сушки начальное распределение влажности по толщине образца определялось каждые 30 мин. С этой целью на расстоянии 50 мм от торца отпиливалась узкая секция шириной $5\text{--}6 \text{ мм}$, которая немедленно раскраивалась на $8\text{--}10$ пластинок толщиной $0,8\text{--}1,0 \text{ мм}$. Пластинки взвешивались на электронных весах с точностью $0,001 \text{ г}$. Перед помещением образца обратно в сушильную камеру его торец вновь покрывался силиконом.

Одним из наиболее надежных и доступных методов неразрушающего контроля пространственного распределения плотности

и связанной с ней влажности в гигроскопичных материалах являются методы, основанные на измерении поглощения рентгеновского излучения [15]. Для проведения экспериментов на базе дифрактометра общего назначения ДРОН-3 был создан стенд, схема которого представлена на рис. 1. Стенд включает в себя источник рентгеновского излучения, состоящий из рентгеновской трубки БСВ-24Cu и высоковольтного источника питания. Система регистрации рентгеновского излучения состоит из сцинтилляционного детектора на основе кристалла NaI, фотоэлектронного умножителя, усилителя-дискриминатора и счетчика импульсов. Блок детектора БДС преобразует рентгеновские кванты в электрические импульсы таким образом, что из квантов с большей энергией, а значит и с меньшей длиной волны, получают импульсы большей амплитуды. Это позволяет распределять рентгеновское излучение по длине волны и проводить спектральный анализ поглощения рентгеновского излучения. Согласованный Co-Ni-фильтр выделяет из общего спектра рентгеновской трубки медное характеристическое излучение CuK_α и совместно с дискриминатором позволяет получить монохроматизированное излучение с длиной волны $\lambda = 0,154 \text{ нм}$.

Для опытов были подготовлены осиновые и сосновые образцы размером

8 – 12×40×100 мм. Перед испытанием все грани образцов, кроме одной, были влагоизолированы. Исследуемый образец помещался на стол гониометра ГУР-8 в координатное устройство, обеспечивающее его горизонтальное перемещение перпендикулярно лучу. Воздух с заданной температурой и влажностью поступал на неизолированную поверхность, создавая условия для односторонней сушки. Регистрация поглощенного рентгеновского излучения осуществлялась набором импульсов с экспозицией 20 с при дискретном перемещении образца с шагом 0,5 мм. Коллимация луча составляла 1 мм по высоте и 0,025 мм по ширине. Измерения осуществлялись каждые 2 ч в течение суток.

Оценка пространственного распределения влажности в образце производилась на основании закона Бэра. Если рассматривать влажную древесину как двухкомпонентную среду, система уравнений для расчета распределения влажности выглядит следующим образом

$$\begin{cases} g_b(x) \cdot \frac{\mu_b}{\rho_b} + g_w(x) \cdot \frac{\mu_w}{\rho_w} = \frac{1}{\rho(x) \cdot d} \ln \left(\frac{I_{0\lambda}}{I_\lambda(x)} \right); \\ g_b(x) + g_w(x) = 1, \end{cases} \quad (1)$$

где $g_b(x)$ и $g_w(x)$ – массовые доли воды и сухой древесины;

ρ_b и ρ_w – плотности воды и сухой древесины, г/см³;

μ_b и μ_w – массовые коэффициенты поглощения рентгеновских лучей для воды и древесины, см²/г;

d – длина образца, см.

Массовые коэффициенты поглощения для воды и древесины определялись предварительно перед экспериментом. Для длины волны $\lambda = 0,154$ нм они оказались равными 9,9 см²/г и 7,5 см²/г соответственно. Это позволило рассчитать пространственное распределение влажности в образцах в различные моменты времени.

Численная оценка функциональной зависимости коэффициента влагопроводности осуществлялась на базе решения обратной коэффициентной задачи для уравнения влаго-

проводности, математическая модель которой включает само уравнение

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a(u) \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right); \quad (2)$$

начальные условия

$$u(x, 0) = u_n(x), \quad (3)$$

и условия на границе

$$\frac{\partial u(0, t)}{\partial x} = 0; \quad a(u) \cdot \frac{\partial u(l, t)}{\partial x} = \beta \cdot (u_s(T, \varphi) - u(l, t)). \quad (4)$$

В качестве функции цели выбиралась невязка отклонения решения задачи (2) – (4) от пространственного распределения влажности, полученного из эксперимента

$$\Phi(a) = \sum_i^l \int_0^l (u(x, t_i) - u_i^e(x))^2 dx \rightarrow \min. \quad (5)$$

Решение поставленной задачи осуществлялось с помощью интегрированного математического пакета Mathcad.

На рис. 2 представлены распределения влажности по толщине березовых образцов, полученные в различные моменты времени. Как видно из рисунка, в начальный момент времени вода по толщине образцов была распределена неравномерно и несимметрично. Однако со временем, благодаря одинаковым условиям влагообмена на пласть образцов, кривые распределения влажности становятся более симметричными и похожими на параболы.

Рассчитанные по полученным экспериментальным данным значения коэффициентов влагопроводности древесины березы, зависящие от ее влажности, представлены на рис. 3.

Как видно из полученной зависимости, повышение влажности древесины приводит к существенному росту коэффициента влагопроводности. Небольшое снижение коэффициента в начале диапазона связано, по-видимому, с неточностью определения локальной влажности.

Распределения влажности по толщине осинового и соснового образцов, полученные неразрушающим методом рентгеноскопии в процессе сушки при комнатных условиях, представлены на рис. 4 и рис. 5.

Полученные распределения влажности в осинном и сосновом образцах наглядно

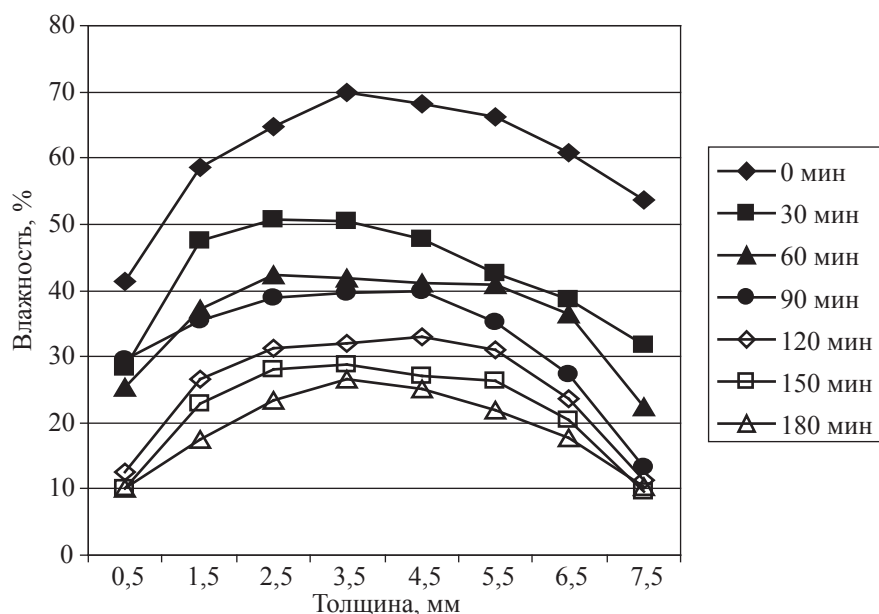


Рис. 2. Распределение послойной влажности по толщине березового образца
Fig. 2. The distribution of layered humidity along the width of a birch sample

показывают, что разрешающая способность рентгеновского неразрушающего метода измерения локальной влажности существенно выше по сравнению с классическим весовым способом определения послойной влажности. Кроме того, только рентгеновский метод позволяет надежно измерять градиенты влажности в небольших объемах и тонких образцах. Используемый расчетный метод позволил вычислить средние коэффициенты влагопроводности в тангенциальном направлении при температуре 20°C для обоих образцов. Для древесины сосны коэффициент влагопроводности оказался равным $1,948 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$, а для древесины осины – $1,064 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$. В дальнейшем планируется получение коэффициентов влагопроводности древесины различных пород при повышенных температурах.

В заключение необходимо отметить, что полученные значения коэффициентов влагопроводности достаточно хорошо согласуются с данными, полученными другими исследователями для древесины тех же пород.

В качестве достоинства классического весового способа определения локальной влажности следует отметить его простоту. Для его реализации не требуется дорогостоящего оборудования и приборов. Но при этом метод является достаточно трудоемким и не позво-

ляет получать надежные данные о локальных значениях влажности в тонких образцах.

Неразрушающий рентгеновский метод измерения локальной влажности имеет высокую разрушающую способность и может быть успешно использован при исследовании тонких образцов. В то же время рентгеновская установка с ионизирующим излучением относится к группе сложного и дорогого оборудования, а ее эксплуатация требует квалифицированного обслуживания. Кроме того, для

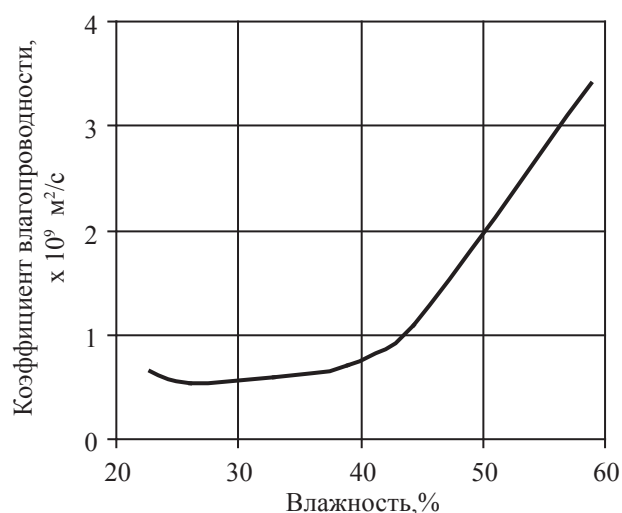


Рис. 3. Зависимость коэффициента влагопроводности древесины березы от влажности
Fig. 3. The dependence of hydraulic conductivity of birch wood on moisture

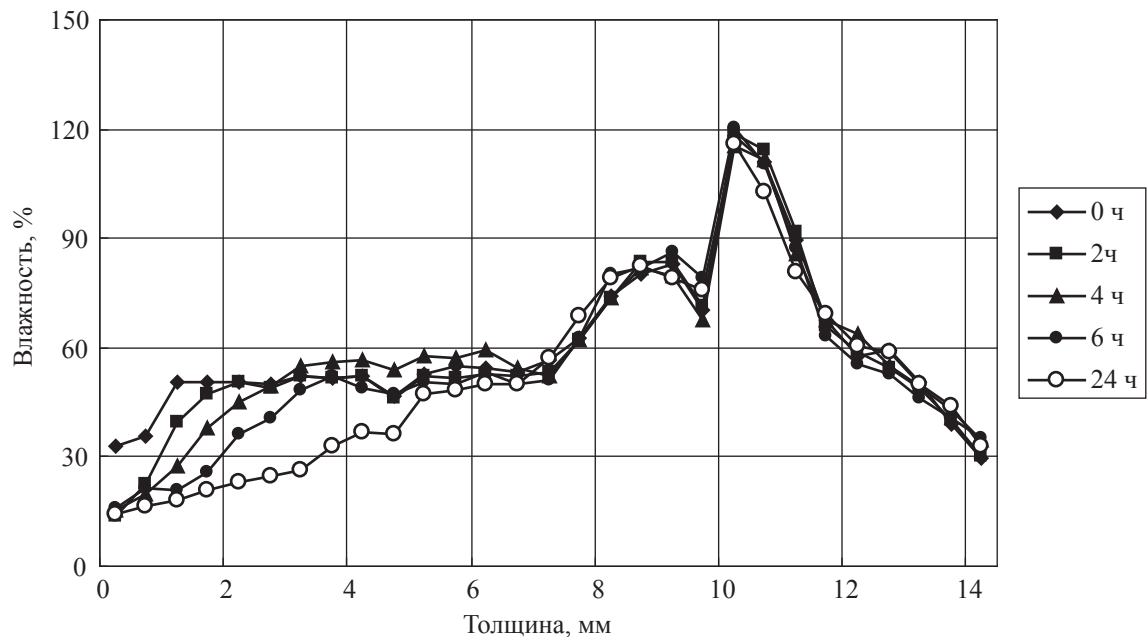


Рис. 4. Распределение влажности в образце осины
Fig. 4. The moisture distribution in an aspen sample

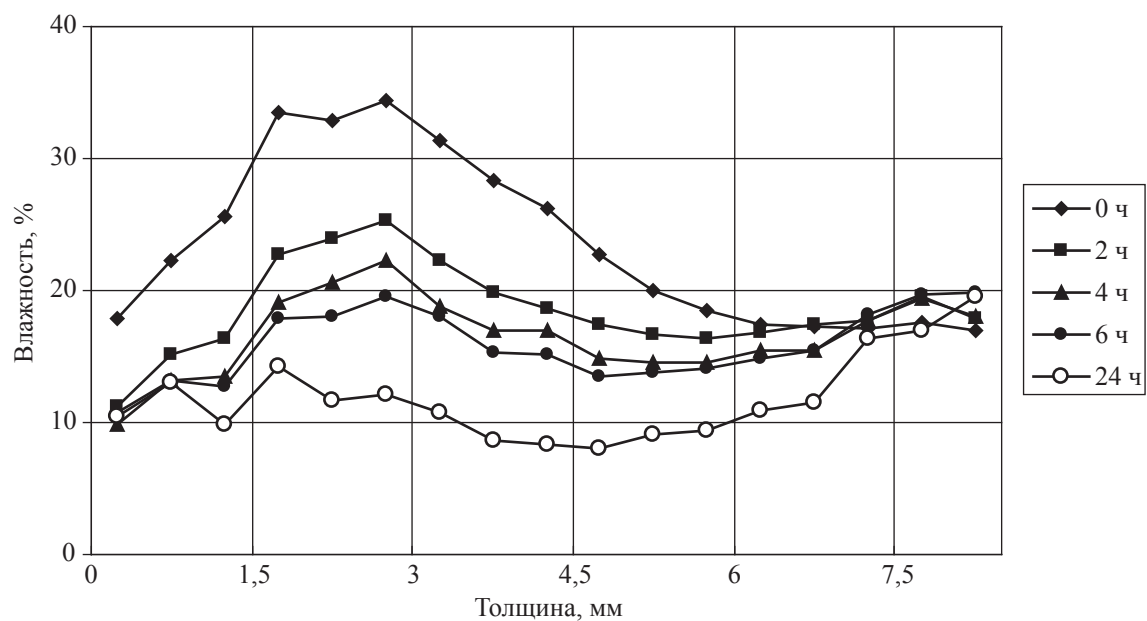


Рис. 5. Распределение влажности в образце сосны
Fig. 5. The moisture distribution in a pine sample

проведения исследований при повышенных температурах на установку необходимо установить специальную климатическую камеру.

Библиографический список

1. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М.: «Энергия», 1968. – 472 с.
2. Skaar, C. Analysis of methods for determining the coefficient of moisture diffusion in wood // Forest Products Journal. –1954.–Vol.4, N 12.–p. 403–410.
3. Choong, E.T. Diffusion coefficients of softwoods by steady-state and theoretical methods Forest Products Journal.– 1965.–Vol.15, N.1.– p. 21–27.
4. Siau, J.F. Transport processes in wood. – Berlin: Springer, 1984.
5. Lee, H.W. Moisture transmission in wood. Moisture transfer and velocity of moisture transmission in a steady state/ H.W. Lee, T. Okano, M.Ohta // Mokuzai Gakkaishi.– 1991.–Vol. 37, №. 2.– p. 101–108.
6. Comstock, G. L. Moisture Diffusion Coefficients in Wood as Calculated from Adsorption, Desorption and Steady-State Data// Forest Products Journal.– 1963.–Vol. 13,N. 3.– p. 97–103.

7. Choong, E.T. Moisture movement in six wood species/ E.T. Choong, P.J. Fogg // Forest Product Journal.– 1968.– Vol. 13, No. 5.– p. 66–70.
8. Шубин, Г.С. Физические основы и расчет процессов сушки древесины / Г.С. Шубин. – М.: Лесная пром-сть, 1973.– 248 с.
9. Wadso, L. Studies of water vapor transport and sorption in wood. Doctoral Dissertation, Report TVBM–1013, Building Materials, Lund University, 1993.
10. Hukka, A. The Effective Diffusion Coefficient and Mass Transfer Coefficient of Nordic Softwoods as Calculated from Direct Drying Experiments// *Holzforschung*.– 1999.– Vol. 53, N.5.– p. 534–540.
11. Liu, J.Y. An Inverse Moisture Diffusion Algorithm for the Determination of Diffusion Coefficient/ J.Y. Liu, W.T. Simpson, S.P. Verrill // *Drying Technology*.– 2001.–Vol. 19, N. 8.– p. 1555–1568.
12. Olek, W. The inverse method for diffusion coefficient identification during water sorption in wood/ W. Olek, J. Weres / *Proceedings of the 3rd COST E15 Workshop on “Softwood drying to specific end–uses”*. Helsinki, Finland, Paper No 27.– 2001.
13. Weres, J. Inverse finite element analysis of technological processes of heat and mass transport in agricultural and forest products/ J. Weres, W. Olek // *Drying Technology*. – 2005.– Vol.23.– p. 1737–1750.
14. Zhou, Q. Zhang, X. Determination of moisture diffusion coefficient of larch board with finite difference method/ Q. Zhou, Y. Cai, Y. Xu // *Bioresources*.– 2011.–Vol. 6, N.2.– p. 1196–1203.
15. Сапожников, И.В. Рентгеноструктурный анализ напряженного состояния нагруженной древесины: дис...канд. техн. наук: 05.21.05: защищена 2.04.1993 / Сапожников Игорь Витальевич. – М., 1993.– 168 с.

DETERMINATION OF DEFFUSION COEFFICIENTS AT LOW TEMPERATURE WOOD DRYING

Sapozhnikov I.V., Assoc. Prof. MSFU, Ph.D. (Tech.)⁽¹⁾; **Skuratov N.V.**, Prof. MSFU, Ph.D.⁽¹⁾; **Alexeeva I.I.**, pg. MSFU⁽¹⁾; **Samoylenko D.A.**, pg. MSFU⁽¹⁾; **Mamontov M.P.**, MSFU⁽¹⁾; **Matveeva K.A.**, MSFU⁽¹⁾

gosha@mgul.ac.ru, skuratov@mgul.ac.ru, alexeeva@mgul.ac.ru, samoylenko@mgul.ac.ru,
mamontov@mgul.ac.ru, matveeva@mgul.ac.ru

⁽¹⁾ Moscow State Forest University (MSFU), 1st Institutskaya st., 1, 141005, Mytischki, Moskow reg., Russia

Specific features of convective wood drying are mainly determined by the character of the internal moisture transfer. The internal resistance depends on wood structure, its temperature, moisture content, moisture flux direction and it can be described by the diffusion coefficient. The modified method of the inverse determination of the diffusion coefficients was used in this paper. Measuring the moisture content distributions in wood during the process of drying was carried out using slicing and x-ray techniques. After processing the moisture distribution data obtained by the slicing technique, the dependence of the diffusion coefficient of birch on moisture content was established in the radial direction at 65°C. With the help of X-ray technique the moisture content profiles in small aspen and pine samples during drying in roomed conditions were obtained. However, the obtained data allowed us to calculate only the average values of the diffusion coefficients in the radial direction. They were equal to $1.64 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ and $1.94 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ for aspen and pine, respectively.

Key words: wood drying, moisture content, slicing technique, x-ray technique, diffusion coefficient.

References

1. Luikov A.V. *Teoriya Sushki* [Theory of Drying]. Moscow: *Energiya* [Energy], 1968, 472 p.
2. Skaar C. Analysis of methods for determining the coefficient of moisture diffusion in wood. *Forest Products Journal*. 1954. Vol. 4, № 12. pp. 403–410.
3. Choong E.T. Diffusion coefficients of softwoods by steady–state and theoretical methods *Forest Products Journal*. 1965. Vol. 15, № 1. pp. 21–27.
4. Siau J.F. *Transport processes in wood*. Berlin: Springer, 1984.
5. Lee H.W., Okano T., Ohta M. Moisture transmission in wood. Moisture transfer and velocity of moisture transmission in a steady state. *Mokuzai Gakkaishi*. 1991. Vol. 37, № 2. pp. 101–108.
6. Comstock G.L. Moisture Diffusion Coefficients in Wood as Calculated from Adsorption, Desorption and Steady–State Data. *Forest Products Journal*. 1963. Vol. 13, № 3. pp. 97–103.
7. Choong E.T., Fogg P.J. Moisture movement in six wood species. *Forest Product Journal*. 1968. Vol. 13, № 5. pp. 66–70.
8. Shubin G.S. *Fizicheskie osnovy i raschet protsessov sushki drevesiny* [Physical basis and calculation processes of drying wood]. Moscow: *Lesnaya promyshlennost'* [Forest industry], 1973, 248 p.
9. Wadso L. Studies of water vapor transport and sorption in wood. Doctoral Dissertation, Report TVBM–1013, Building Materials, Lund University, 1993.
10. Hukka A. The Effective Diffusion Coefficient and Mass Transfer Coefficient of Nordic Softwoods as Calculated from Direct Drying Experiments. *Holzforschung*. 1999. Vol. 53. № 5. pp. 534–540.
11. Liu J.Y., Simpson W.T., Verrill S.P. An Inverse Moisture Diffusion Algorithm for the Determination of Diffusion Coefficient. *Drying Technology*. 2001. Vol. 19, № 8. pp. 1555–1568.
12. Olek W., Weres J. The inverse method for diffusion coefficient identification during water sorption in wood. *Proceedings of the 3rd COST E15 Workshop on “Softwood drying to specific end–uses”*. Helsinki, Finland, № 27. 2001.
13. Weres J., Olek W. Inverse finite element analysis of technological processes of heat and mass transport in agricultural and forest products. *Drying Technology*. 2005. Vol.23. p. 1737–1750.
14. Zhou Q., Cai Y., Xu Y. Zhang, X. Determination of moisture diffusion coefficient of larch board with finite difference method. *Bioresources*. 2011. Vol. 6, № 2. pp. 1196–1203.
15. Sapozhnikov I.V. *Rentgenostrukturnyy analiz napryazhennogo sostoyaniya nagruzhennoy drevesiny* [X–ray diffraction analysis of the stress state of the loaded timber]: diss...kand. tekhn. nauk: 05.21.05: zashchishchena 2.04.1993. Moscow, 1993. 168 p.