

УДК 674.047

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВЛАЖНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ

Н.В. СКУРАТОВ, *проф., МГУЛ канд. техн. наук⁽¹⁾*,
И.В. САПОЖНИКОВ, *доц., МГУЛ, канд. техн. наук⁽¹⁾*,
Д.А. САМОЙЛЕНКО, *асп. МГУЛ⁽¹⁾*,
И.И. АЛЕКСЕЕВА, *асп. МГУЛ⁽¹⁾*

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

⁽¹⁾ ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса»

141005, Московская обл., г. Мытищи-5, ул 1-я Институтская, д. 1, МГУЛ

Для процессов конвективной сушки древесины характерными являются граничные условия 3-го рода. В соответствии с ними плотность потока влаги на поверхности равна коэффициенту влагообмена, умноженному на разность между поверхностной и равновесной влажностью. Из этого равенства можно вычислить коэффициент влагообмена. Если для определения плотности потока влаги достаточно периодически фиксировать вес опытного образца, то измерение поверхностной влажности связано со значительными трудностями. Весовой способ определения послойной влажности имеет низкую разрешающую способность. Современные косвенные методы, в которых применяется компьютерная томография, рентгеноскопия, а также спектроскопия в инфракрасном диапазоне, обеспечивают достаточно высокое разрешение. Однако они не позволяют надежно измерять влажность на поверхности образцов из древесины из-за многочисленных микроповреждений, образующихся при их изготовлении. В данной работе использован новый способ определения поверхностной влажности древесины. Ее величина определяется как равновесная влажность в тонком пограничном слое воздуха, параметры которого измеряются непосредственно над поверхностью древесины. Для измерения температуры и относительной влажности воздуха в микрообъеме у поверхности опытного образца был использован новейший миниатюрный датчик Sensirion SHT20, установленный в специальном приспособлении. Точность и необходимая длительность измерений были определены по результатам измерения влажности трех партий образцов толщиной 1 мм из древесины сосны, березы и дуба, влажность которых была заранее известна. Способ был опробован при проведении исследований кинетики и динамики сушки тонких древесных материалов. Для измерения поверхностной влажности датчик, установленный в специальном приспособлении, с помощью ручного манипулятора прижимался на 3 мин к пласти экспериментального образца через определенные промежутки времени. Полученные в ходе опытных сушек образцов из древесины березы и дуба кривые изменения поверхностной влажности асимптотически приближаются к значению равновесной влажности, что характерно для классического процесса десорбции.

Ключевые слова: сушка древесины, температура, относительная влажность воздуха, поверхностная влажность, равновесная влажность.

В процессе низкотемпературной конвективной сушки древесины внутренний влагоперенос (внутренняя диффузия) происходит, в основном, под действием градиента влажности. Скорость сушки лимитирована коэффициентом влагопроводности, величина которого зависит от многих факторов [1]. Интенсивность удаления влаги с поверхности материала (внешняя диффузия) зависит от условий влагообмена. Для сушки древесины характерными являются граничные условия 3-го рода [2]. В соответствии с ними плотность потока влаги на поверхности равна коэффициенту влагообмена, умноженному на разность между поверхностной и равновесной влажностью. Из этого равенства можно вычислить коэффициент влагообмена, если в процессе проведения экспериментальной сушки определять плотность потока удаляемой с поверхности опытного образца влаги и измерять поверхностную влажность. Если для определения

плотности потока влаги достаточно периодически фиксировать вес опытного образца, то измерение поверхностной влажности связано со значительными трудностями.

Классический весовой способ определения послойной влажности имеет сравнительно невысокую разрешающую способность [3, 4, 5]. С его помощью измерить с удовлетворительной точностью влажность древесины непосредственно на поверхности опытного образца не представляется возможным. Ряд исследователей для определения локальной влажности использовали косвенные методы, в которых применяется компьютерная томография, рентгеноскопия [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13], а также спектроскопия в инфракрасном диапазоне [14].

Однако даже столь современные методы, обеспечивающие высокое разрешение, не позволяют надежно измерять поверхностную влажность. Причиной этого является наличие

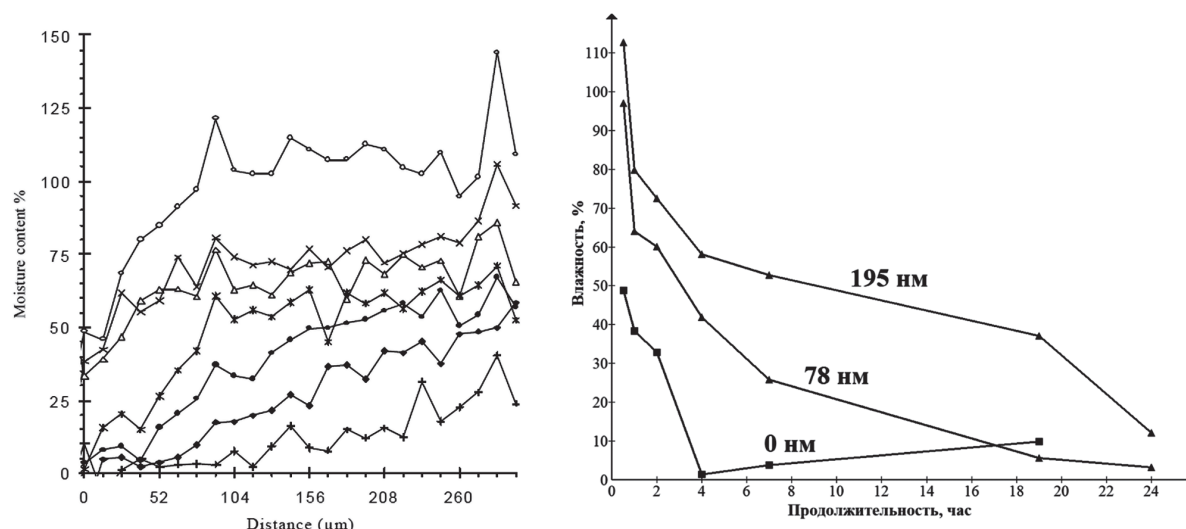


Рис. 1. Распределения влажности по толщине соснового образца в процессе сушки при температуре 43–46 °C и относительной влажности 16–18 % (слева) и кривые изменения влажности на различной глубине (справа)
 Fig. 1. The distributions of moisture through the thickness of a pine sample during drying it at a temperature of 43–46 °C and 16–18 % relative humidity (on the left) and the curves of the moisture changes at various depths (on the right)

многочисленных микроповреждений поверхности исследуемых образцов древесины, которые неизбежно появляются при их изготовлении [15].

Поверхностный слой любого образца из древесины состоит из целых и поврежденных в различной степени клеток, что даже при небольшом увеличении хорошо видно на продольных срезах. В полостях целых клеток сырой древесины может находиться какое-то количество свободной воды. При использовании метода рентгеноскопии локальная влажность древесины количественно оценивается по степени ослабления проходящего через нее рентгеновского луча. В ходе экспериментальной сушки наружные клетки постепенно высыхают и соответственно деформируются, причем, как правило, неравномерно. В результате тонкий поверхностный слой высыхая, изменяет свою структуру, что негативно отражается на точности измерения его влажности.

Это явление наглядно иллюстрируют экспериментальные данные, полученные в работе [7]. В левой части рис. 1 представлены распределения влажности в тонкой поверхностной зоне соснового образца в процессе его сушки, а справа изображены построенные по этим данным кривые изменения локальной влажности во времени в трех зонах. Очевидно, что зафиксированный рост поверх-

ностной влажности при сушке в очень сухом воздухе можно объяснить только чрезмерной погрешностью ее измерения.

В данной работе использован новый способ определения поверхностной влажности древесины. Ее величина определяется как равновесная влажность в тонком пограничном слое воздуха, параметры которого измеряются непосредственно над поверхностью древесины. Для измерения температуры и относительной влажности воздуха в микрообъеме у поверхности опытного образца был использован новейший миниатюрный датчик Sensirion SHT20, который крепился в специальном приспособлении (рис. 1). С помощью второго такого же датчика измерялись параметры окружающего воздуха.

Датчик Sensirion SHT20 имеет экстремально малые размеры, равные 3×3×1,1 мм. При таких размерах датчика рабочий объем воздуха над поверхностью древесины, параметры которого измеряются, составляет лишь 2–3 мм³. Благодаря этому в процессе измерения с поверхности древесины, находящейся под датчиком, в рабочий объем воздуха попадает лишь незначительное количество водяного пара и влажность поверхностного слоя почти не изменяется.

Датчик позволяет измерять относительную влажность воздуха в диапазоне от

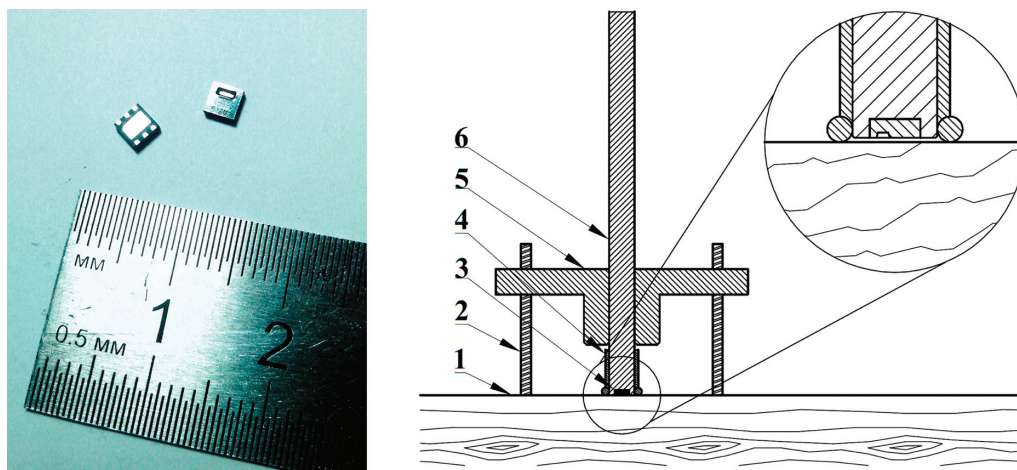


Рис. 2. Внешний вид датчика Sensirion SHT20 (слева) и его расположение в приспособлении для измерения поверхностной влажности (справа): 1.Образец. 2.Регулировочный винт. 3.Датчик SHT20. 4.Резиновый кожух. 5.Пластиковый корпус. 6. Держатель

Fig. 2. The appearance of Sensirion SHT20 sensor (on the left) and its location in the device for measurement of surface moisture (on the right): 1.A sample. 2.A levelling screw. 3. A SHT20 sensor. 4. A rubber cover. 5. A plastic casing. 6. A holder

0 % до 100 % в широком температурном диапазоне ($-40 - 125^{\circ}\text{C}$). Отличительной особенностью датчика является наличие встроенного аналого-цифрового преобразователя, что обеспечивает высокую скорость отклика (8 сек), а, следовательно, и скорость измерения (рис. 2). Абсолютная погрешность датчика в основной части рабочего диапазона $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ по температуре и $\pm 3,0$ % по относительной влажности, а на краях диапазона может достигать до $\pm 1,55^{\circ}\text{C}$ по температуре и $\pm 4,5$ % по относительной влажности [16].

Для измерения относительной влажности и температуры воздуха непосредственно над поверхностью древесины в процессе сушки было изготовлено устройство, конструкция которого приведена на рис. 2. Датчик установлен в полости на конце держателя диаметром 8 мм, закрепленного в пластиковом корпусе. Регулировочные винты на пластиковом корпусе позволяют устанавливать датчик на расстоянии 0,2–0,3 мм от поверхности опытного образца. Резиновый кожух вокруг датчика препятствует попаданию окружающего воздуха в рабочую зону.

Для оценки точности определения поверхностной влажности по измеряемым с помощью датчика Sensirion SHT20 значениям температуры и влажности была проведена серия экспериментов. В соответствии с тре-

бованиями ГОСТ 29244-91 [17] было подготовлено три эксикатора с водным раствором глицерина. Концентрация глицерина в растворах в первом, втором и третьем эксикаторах была равной 52 %, 69 % и 87,5 %. При таких концентрациях в эксикаторах создавалась среда, обеспечивающая равновесную влажность равную 16 %, 12 % и 8 % соответственно. Для выравнивания температуры и относительной влажности воздуха в эксикаторах были установлены вентиляторы, приводимые во вращение со скоростью 76 об./мин двигателями со встроенными редукторами РД-09.

Для выдержки в эксикаторах были подготовлены образцы из древесины сосны, березы и дуба размерами $50 \times 50 \times 1$ мм. Кромки и торцы образцов влагоизолировались с помощью силиконового герметика. В каждый эксикатор закладывалось по два образца каждой породы. Контроль за изменением влажности образцов осуществлялся путем их периодического взвешивания на электронных весах с точностью до 0,001 г. Выдержка образцов в эксикаторе заканчивалась, когда суточное изменение массы каждого из них становилось менее 0,01 г.

После стабилизации массы каждый образец извлекался из эксикатора для измерения поверхностной влажности с помощью датчика. Измерения проводились при комнатной температуре. Каждый образец укладывался на

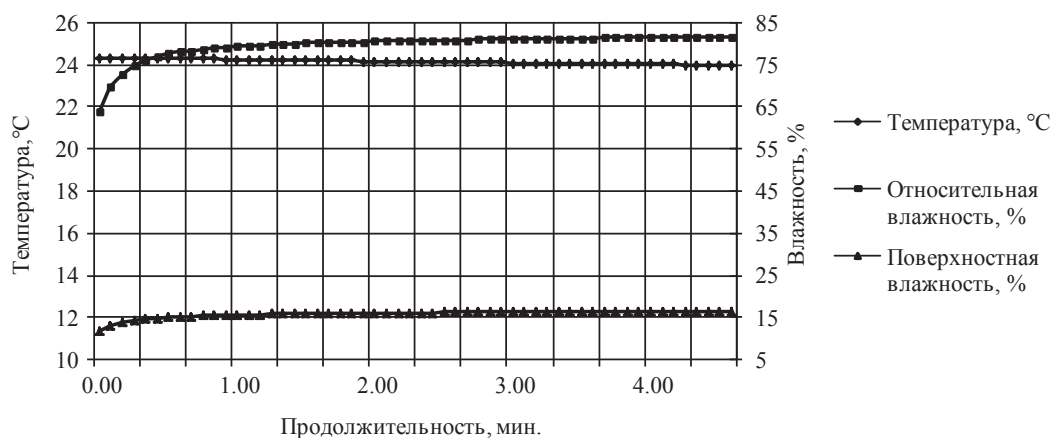


Рис. 3. Изменения температуры и относительной влажности воздуха над поверхностью березового образца, а также поверхностной влажности в процессе их измерения

Fig. 3. Changes in the temperature and the relative humidity above the birch sample surface and those in the surface humidity in the process of measuring them

ровную поверхность и на него устанавливался датчик, как показано на рис. 2. Замер продолжался до момента установления постоянной относительной влажности воздуха в поверхностной зоне образца (рис. 3). Оказалось, что для достижения постоянной влажности воздуха при комнатной температуре достаточно 3–4 мин. С ростом температуры это время сокращается. По окончании замера влажность каждого образца уточнялась весовым способом.

Уточненная средняя влажность образцов в первом эксикаторе составила 16,3 %, во втором – 12,08 %, а в третьем – 8,29 %. Поверхностная влажность образцов определялась по общепринятой диаграмме равновесной влажности для измеренных датчиком Sensirion SHT20 значений температуры и относительной влажности [3]. Средняя расчетная поверхностная влажность для них составила 14,8 %, 10,82 % и 7,56 %, а погрешность измерения – 1,5 %, 1,26 % и 0,73 % соответственно. Ошибка при определении поверхностной влажности может быть связана с небольшой подсушкой поверхностных зон образцов при подготовке и проведении измерений.

Предложенный метод определения поверхностной влажности был опробован при проведении исследований кинетики и динамики сушки тонких древесных материалов. Опытные сушки проводилась в лабораторной сушильной камере, оснащенной системой автоматического регулирования параметров сушильного агента и устройством для периодического взвешивания

образцов в ходе эксперимента. Для измерения поверхностной влажности датчик, установленный в описанном приспособлении, с помощью ручного манипулятора прижимался на 3 мин к пласти экспериментального образца. На время измерения вентилятор камеры выключался. На рис. 4 показаны результаты измерения температуры и относительной влажности воздуха в рабочем объеме датчика, а также расчетные значения поверхностной влажности при сушке березового образца размерами 8×60×400 мм. Первый замер был проведен сразу же после прогрева образца. Как видно из графика, после прижатия датчика к образцу начиналось интенсивное увлажнение воздуха в его рабочем объеме. Поверхностная влажность рассчитывалась по максимальному значению относительной влажности и соответствующей ему температуре воздуха под датчиком. После этого приспособление отводилось в сторону. После включения вентилятора состояние воздуха в камере быстро восстанавливалось, что иллюстрируют показания датчика. При каждом последующем замере датчик регистрировал все более низкую относительную влажность воздуха в рабочем объеме, что, очевидно, обусловлено постепенным снижением поверхностной влажности древесины.

Сушка в аналогичных условиях дубового образца тех же размеров проходила медленнее (рис. 5). В этом эксперименте поверхностная влажность определялась по двум последовательным замерам состояния воздуха под дат-

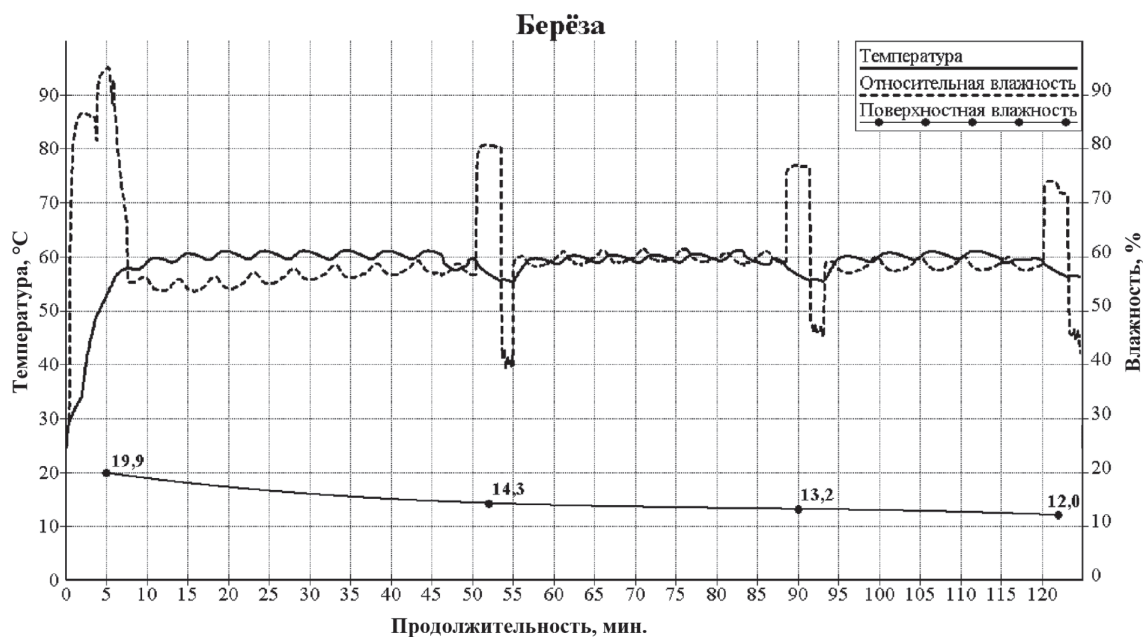


Рис. 4. Изменения температуры, относительной влажности воздуха и расчетной поверхностной влажности в процессе сушки березового образца

Fig. 4. Changes in the temperature, in the relative air humidity and in the calculated surface moisture during drying a birch sample

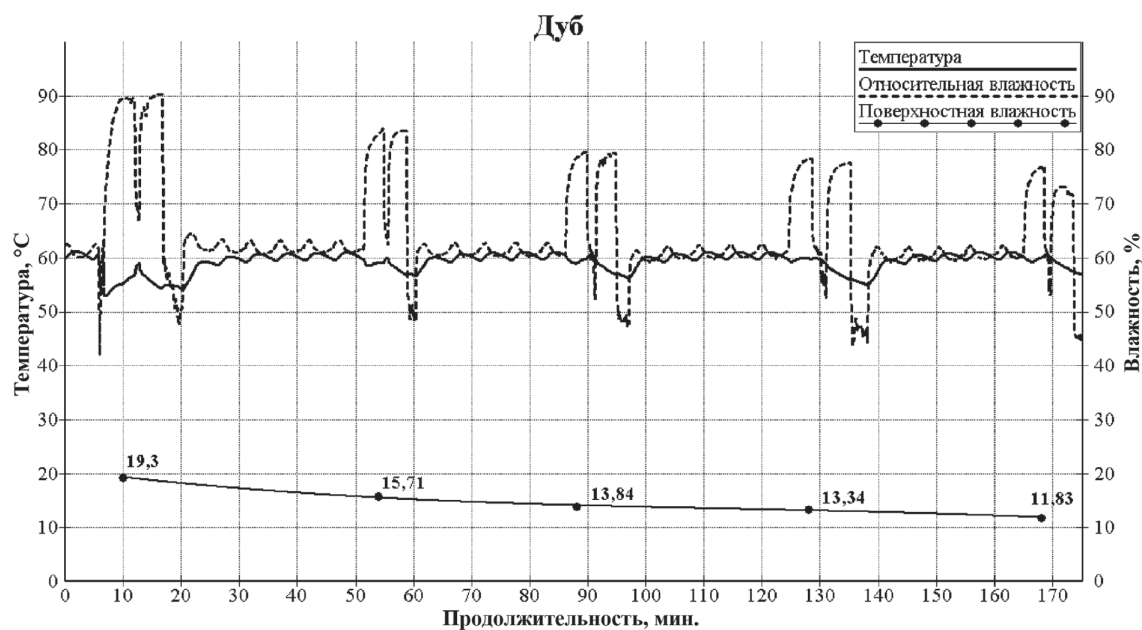


Рис. 5. Изменения температуры, относительной влажности воздуха и расчетной поверхностной влажности в процессе сушки дубового образца

Fig. 5. Changes in the temperature, the relative air humidity and in the calculated surface moisture during drying an oak specimen

чиком. Как и в предыдущем опыте, полученная кривая изменения поверхностной влажности асимптотически приближается к значению равновесной влажности, равной 9,2 %, что характерно для классического процесса десорбции.

Полученные результаты позволяют заключить, что разработанный способ может

использоваться для измерения поверхностной влажности древесины с удовлетворительной точностью непосредственно в ходе процесса сушки. В дальнейшем планируется усовершенствовать предложенную методику и использовать ее при исследовании кинетики и динамики процессов конвективной суш-

ки древесины, а также для определения коэффициентов влагообмена.

Библиографический список/References

1. Skuratov N., Sapozhnikov I., Alexeeva I., Mamontov M., Matveeva K., Samoilenko D. Measurements during wood drying based on x-ray and slicing techniques and computation of diffusion coefficients//Pro Ligno. 2015. V. 11. No. 4. pp. 383-388.
2. Лыков, А.В. Кинетика и динамика процессов сушки и увлажнения / А.В. Лыков. – Гизлегпром, 1938. – 592 с. Lykov A.V. *Kinetika i dinamika processov sushki i uvlazhneniya* [Kinetics and dynamics of wetting and drying processes]. Gizlegprom, 1938. 592 p.
3. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки древесины. – Архангельск: ЦНИИМОД, 1985 – 143 с. *Rukovodyashhie tekhnicheskie materialy po tehnologii kamernoy sushki drevesiny* [Guiding technical materials on the technology kiln drying of wood]. Arhangel'sk: CNIIMOD, 1985, 143 p.
4. Davis J. R., Ilic J., Wells P. Moisture content in drying wood using direct scanning gamma-ray densitometry //Wood and fiber science. 1993. V. 25. No. 2. pp. 153-162.
5. Parun M., Milić G., Kolin B. Moisture content profiles and stresses in beech timber during conventional drying. First serbian forestry congress under slogan: "Future with forests". Belgrade, Serbia, Belgrade University, Faculty of Forestry, 11-13 November, 2010. pp. 1394-1403.
6. Wiberg P., Morén T. J. Moisture flux determination in wood during drying above fibre saturation point using CT-scanning and digital image processing. European Journal of Wood and Wood Products. 1999. V. 57. No. 2. pp. 137-144.
7. Rosenkilde A. Moisture content profiles and surface phenomena during drying of wood. Swedish Institute for Wood Technology Research, 2002. 36 p.
8. Baettig R., Rémond R., Perré P. Measuring moisture content profiles in a board during drying: a polychromatic X-ray system interfaced with a vacuum/pressure laboratory kiln. Wood Science and Technology. 2006. V. 40. No. 4. pp. 261-274.
9. Alkan S., Zhang Y., Lam F. Moisture distribution changes and wetwood behavior in subalpine fir wood during drying by using high X-ray energy industrial CT scanner. Drying technology. 2007. V. 25. No. 3. pp. 483-488.
10. Watanabe K., Saito, Y., Avramidis, S., Shida, S. Non-destructive measurement of moisture distribution in wood during drying using digital X-ray microscopy. Drying technology. 2008. V. 26. No. 5. pp. 590-595.
11. Freyburger C., Longuetaud, F., Mothe, F., Constant, T., Leban, J. Measuring wood density by means of X-ray computer tomography //Annals of forest science. 2009. V. 66. No. 8. pp. 804.
12. Cai Z. A new method of determining moisture gradient in wood. Forest Products Journal. 2008. V. 58. No 7/8. pp. 41-45.
13. Cherepanova E., Hansson L. Determination of wood moisture properties by using CT-scanner in a controlled environment. 7th meeting of the Nordic-Baltic Network In Wood Material Science & Engineering (WSE). October 27-28, 2011, Oslo, Norway. pp. 137-142.
14. Eom C.D., Park J.H., Choi I.G., Han Y., Yeo H. Determining surface emission coefficient of wood by using theoretical methods and near-infrared spectroscopy. Wood and Fiber Science. 2013. V. 45, No.1, pp. 76-83.
15. Skuratov N.V. Microstructure of wood surface and external mass transfer. 2009 IAWS Plenary meeting and conference. Forest as a renewable source of vital values for changing world. 15-21 June 2009 Saint-Petersburg – Moscow, Russia.-SPb.: SPbGLTA. 2009. pp. 119.
16. http://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity/Sensirion_Humidity_SHT20_Datasheet_V3.
17. ГОСТ 29244-91 (ИСО 483-88). Пластмассы. Небольшие контейнеры для кондиционирования и испытания с использованием водных растворов для поддержания постоянного значения относительной влажности. – Введ. 01.01.93. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. 10 p. GOST 29244-91 (ISO 483-88). *Plastmassy. Nebol'shie kontejnery dlja kondicionirovaniya i ispytaniya s ispol'zovaniem vodnyh rastvorov dlja podderzhanija postojannogo znachenija otnositel'noj vlazhnosti* [Plastics. Small containers for conditioning and testing using aqueous solutions to maintain a constant relative humidity]. Introduced. 01.01.93. Moscow: IPK Standards Publ. 2004. 10 p. (Interstate standard).

METHOD FOR DETERMINING THE WOOD SURFACE MOISTURE CONTENT

Skuratov N.V., Prof. MSFU, Ph.D. (Tech.)⁽¹⁾; Sapozhnikov I.V., Assoc. Prof. MSFU, Ph.D. (Tech.)⁽¹⁾; Samoilenko D.A., pg. MSFU⁽¹⁾; Alexeeva I.I., pg. MSFU⁽¹⁾

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

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

The boundary conditions of the 3rd kind are typical of convective wood drying. According to them, the moisture flux density on the surface is equal to surface emission coefficient multiplied by the difference between the surface moisture content and the equilibrium moisture content. The surface emission coefficient can be found from this equality. To determine moisture flow density it is enough to measure regularly the weight of a test sample while the measurement of surface moisture is associated with considerable difficulties. The oven-dry method of determining the local wood moisture content has low resolution. Modern indirect methods using computer tomography, X-ray and infrared spectroscopy provide the sufficiently high resolution. However, they do not allow the reliable measurement of the surface moisture content of wood samples due to the numerous of microdamages formed during their manufacture. The new method of determining the moisture content of wood surface was used in this study. Its value is determined as the equilibrium moisture content in a thin boundary layer of air which parameters are measured directly over the surface of wood. To measure the temperature and the relative air humidity in the micro-volume near the surface of a test sample the newest miniature sensor Sensirion SHT20, mounted in a special device, was used. The accuracy and the necessary duration of measurements were determined by measuring moisture content of three batches of 1 mm thick samples of pine, birch and oak with known moisture content in advance. The method has been tested when researching kinetics and dynamics of drying of thin wood materials. To measure the surface moisture content, the sensor mounted in a special device was pressed against the side surface of the test sample for 3 minutes via certain time intervals using a hand manipulator. The curves of changes in the surface moisture content received during the experimental drying of samples from birch and oak asymptotically approach the equilibrium moisture content that is typical of classical desorption process.

Keywords: wood drying, temperature, relative air humidity, surface moisture content, equilibrium moisture content.