

УДК 674.047

DOI: 10.18698/2542-1468-2017-4-78-82

## ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВЛАЖНОСТИ НА ВЛАГООБМЕН ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СУШКЕ ДРЕВЕСИНЫ

**Н.В. Скуратов**

МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1  
skuratov@mgul.ac.ru

В процессе низкотемпературной сушки перемещение воды изнутри к поверхности древесины происходит главным образом под действием градиента влажности. Интенсивность удаления влаги из поверхностных слоев древесины определяется условиями ее взаимодействия с сушильным агентом. При сушке неизбежно возникает изменение размеров, внешнего вида и взаимного расположения анатомических элементов древесины. Многочисленные исследования, в которых были использованы современные методы компьютерной томографии и рентгеноскопии, показали, что наибольшие изменения при сушке происходят в поверхностных слоях древесины, непосредственно контактирующих с сушильным агентом. При механической обработке древесины значительная часть клеток на поверхности в различной степени повреждается. В процессе сушки древесины как целые, так и поврежденные наружные клетки благодаря усушке деформируются. Диаметры микрокапилляров в их стенках постепенно уменьшаются. Соответственно, сокращается суммарная площадь менисков капилляров, с которых испаряется вода. Это, в свою очередь, приводит к изменению характера влагообмена. В работе показано, что интенсивность влагообмена зависит не только от параметров воздуха, но и от характеристик физических свойств древесины: базисной плотности и коэффициента объемной усушки. Приведены зависимости относительной площади испарения с поверхности древесины сосны и дуба от влажности. Полученные данные будут использованы при нахождении коэффициентов влагообмена при низкотемпературной сушке древесины различных пород.

**Ключевые слова:** сушка древесины, влагообмен, поверхностная влажность, базисная плотность древесины

**Ссылка для цитирования:** Скуратов Н.В. Влияние поверхностной влажности на влагообмен при низкотемпературной сушке древесины // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 4. С. 78–82.  
DOI: 10.18698/2542-1468-2017-4-78-82

Классическая конвективная сушка проходит в горячем воздухе, который, с одной, стороны, нагревает древесину, а с другой — поглощает испаряемую из нее воду. При низкотемпературном процессе перемещение воды изнутри к поверхности древесины происходит главным образом под действием градиента влажности. Интенсивность процесса внутреннего влагопереноса характеризуется коэффициентом влагопроводности, который зависит от направления потока, температуры, плотности, а также от влажности древесины [1, 2]. Скорость удаления влаги из поверхностных слоев древесины определяется характером ее взаимодействия с сушильным агентом.

В результате сушки размеры поперечного сечения пиломатериалов заметно уменьшаются, в то же время потребительские свойства древесины как материала существенно улучшаются. В некоторых случаях из-за чрезмерно длительного нахождения в горячем воздухе древесина может потемнеть и даже снизить свою прочность и эластичность [3]. Наибольшие изменения в процессе сушки древесины наблюдаются на ее поверхности, поскольку влажность поверхности снижается наиболее быстро. Целью данной работы является исследование влияния величины поверхностной влажности древесины на характер влагообмена при низкотемпературной сушке.

### Материалы и методы

Взаимодействие древесины с циркулирующим в сушильной камере воздухом является важной частью сушильного процесса и которая во многом определяет характер его протекания. При моделировании процесса конвективной сушки в качестве условий, описывающих это взаимодействие, в большинстве случаев используют граничные условия 3-го рода [4]. В соответствии с описывающим эти условия уравнением плотность потока воды, испаряющейся с поверхности сохнувшей древесины, пропорциональна разности между поверхностной и равновесной влажностью. Коэффициентом пропорциональности в этом уравнении является коэффициент влагопроводности:

$$q = \alpha_u \rho_b (u_{\text{пов}} - u_p), \quad (1)$$

где  $q$  — плотность потока удаляемой с поверхности воды;

$\alpha_u$  — коэффициент влагообмена, отнесенный к разности влажности на поверхности  $u_{\text{пов}}$  и равновесной влажности  $u_p$ ;

$\rho_b$  — базисная плотность древесины.

Из этого равенства можно вычислить коэффициент влагообмена, если при проведении экспериментальной сушки весовым способом определять плотность потока влаги, удаляемой с боковых

поверхностей опытного образца, и измерять поверхностную влажность [5, 6].

Плотность потока влаги  $q$  определяется как количество воды, удаляемое в единицу времени с единичной поверхности образца. При снижении влажности структура древесины вследствие усушки и воздействия горячего воздуха, в отличие от многих капиллярно-пористых тел, существенно изменяется. В результате сушки неизбежно искажаются размеры, внешний вид и взаимное расположение анатомических элементов древесины. Таким образом, вода при сушке удаляется с поверхности древесины, состояние которой (а следовательно, и характеристики) непрерывно изменяется.

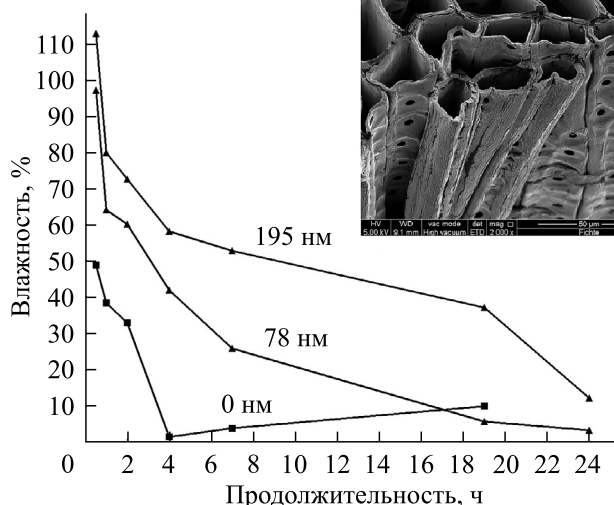
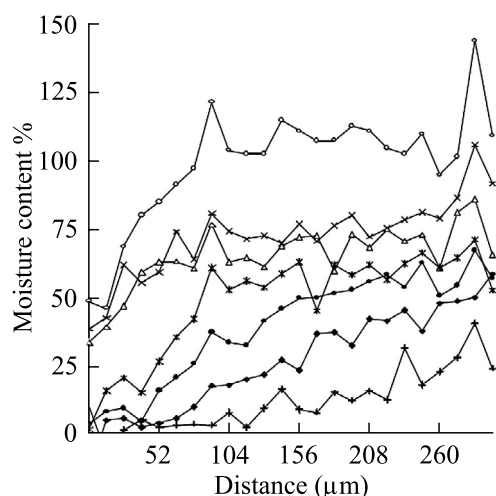
На рис. 1 показан один и тот же участок поверхности образца из древесины дуба толщиной 2 мм и шириной 50 мм до и после сушки при

комнатной температуре. Как видно из рисунка, в результате сушки текстура древесины заметно изменилась. Очевидно, что подобные изменения имеют место при сушке любых пиломатериалов.

Результаты исследования кинетики и динамики сушки с помощью самых современных методов, например компьютерной томографии, также дают основания полагать, что в древесине, особенно в ее поверхностных слоях в ходе процесса происходят существенные изменения. В работе [7] с помощью компьютерного томографа получены кривые распределения влажности по толщине соснового образца на различных этапах его низкотемпературной сушки. Высокая разрешающая способность прибора дала возможность определить влажность в слоях толщиной до 13 мкм (рис. 2). Результаты обработки этих кривых, приведенные на этом же рисунке, позволяют



**Рис. 1.** Внешний вид образца из древесины дуба до (слева) и после (справа) сушки  
**Fig. 1.** Appearance of a sample from oak wood to (left) and after (right) drying



**Рис. 2.** Распределение влажности по толщине соснового образца при низкотемпературной сушке (слева), кривые изменения влажности на различной глубине и микрофотография поверхности образца (справа)

**Fig. 2.** The distribution of moisture over the thickness of a pine sample at low-temperature drying (left), curves of changes in humidity at various depths and a micrograph of its surface (right)

заключить, что неестественное изменение влажности поверхностного слоя могут быть связаны только с искажением структуры этого слоя. Подтверждение этого предложения можно видеть на микрофотографии (см. рис. 2, справа). Наружные клетки, постепенно высыхая, деформируются, как правило, неравномерно, что и приводит к изменениям в структуре поверхностных слоев образцов древесины [8]. Примерно то же самое происходит в поверхностных слоях пиломатериалов и заготовок, которые предварительно подвергались значительным механическим воздействиям в процессе распиловки, при их сушке в промышленных сушильных камерах. Даже при небольшом увеличении на продольных срезах любого образца из древесины хорошо видно, что его поверхностные слои состоят как из целых, так и поврежденных в различной степени клеток.

Древесина является капиллярно-пористым телом, пористость которого характеризуется относительным объемом пустот при нулевой влажности. Для отечественных пород ее величина колеблется в пределах 40...77 % [9]. В процессе сушки древесины вода в виде жидкости и пара перемещается по капиллярам из внутренних слоев к поверхности, с которой удаляется в результате влагообмена. Количество и размеры капилляров в древесине данной породы зависят от ее плотности. На рис. 3 в качестве примера приведены зависимости относительного объема пор (капилляров) от их диаметров в древесине тополя с низкой и высокой плотностью [10]. Из графика видно, что чем плотнее древесина, тем меньше диаметры ее капилляров. На основании этого можно заключить, что плотность древесины должна влиять на характер влагообмена при сушке.

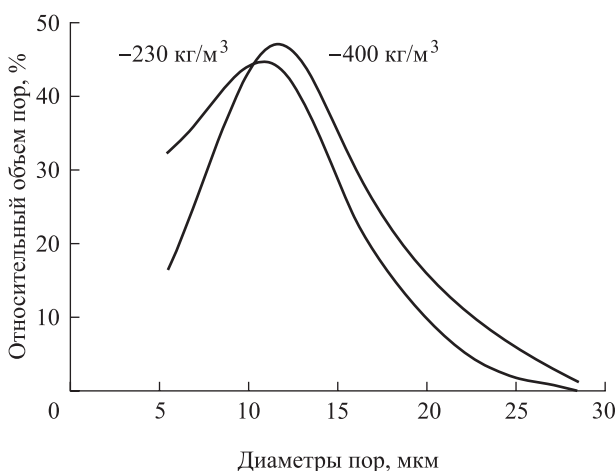


Рис. 3. Распределение пор по диаметрам в древесине тополя с низкой и высокой плотностью

Fig. 3. Pore distribution by diameter in poplar wood with low and high density

## Результаты и обсуждение

По аналогии с теплообменом интенсивность влагообмена принято определять по отношению ко всей площади поверхности сохнущего материала. В реальности испарение воды при сушке происходит только с менисков капилляров, выходящих на поверхность древесины. Их относительная суммарная площадь  $S_k$ , которая существенно меньше площади поверхности сохнущего материала, может быть рассчитана по следующей формуле:

$$S_k = \frac{0,001u_{пов}p_b}{1 - K_\beta(u_{п.н} - u_{пов})}, \quad (2)$$

где  $K_\beta$  — коэффициент объемной усушки древесины;

$u_{п.н}$  — предел насыщения клеточных стенок.

Кривые на рис. 4, построенные по формуле (2), иллюстрируют влияние влажности на величину реальной площади испарения при сушке древесины сосны и дуба. Оказалось, что при влажности, равной пределу насыщения клеточных стенок, для древесины дуба эта площадь составляет 17,2 %

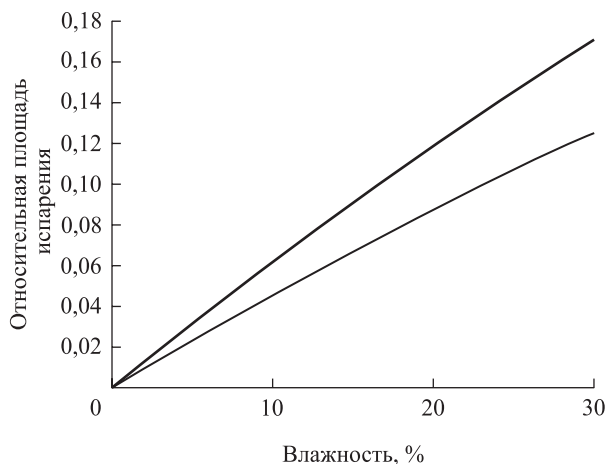


Рис. 4. Зависимость относительной площади испарения с поверхности древесины сосны и дуба от влажности

Fig. 4. Dependence of the relative area of evaporation from the surface of pine and oak wood from humidity

от площади поверхности доски или заготовки, для древесины сосны — 12,6 %. Очевидно, что снижение поверхностной влажности ведет к уменьшению этой площади и, как следствие, к изменению характера влагообмена. Зная базисную плотность и коэффициенты объемной усушки, несложно получить аналогичные зависимости для древесины других пород.

## Выводы

Полученные результаты позволяют заключить, что при описании влагообмена в процессе низкотемпературной сушки необходимо учитывать не только параметры сушильного агента, но и показатели физических свойств древесины: базисную плотность и коэффициент объемной усушки. В дальнейшем новые данные будут использованы при нахождении коэффициентов влагообмена при низкотемпературной сушке древесины различных пород.

## Список литературы

- [1] Определение коэффициентов влагопроводности при низкотемпературной сушке древесины И.В. Сапожников, Н.В. Скуратов, И.И. Алексеева, Д.А. Самойленко, М.П. Мамонтов, К.А. Матвеева // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2016. № 4. С. 34–39.
- [2] Skuratov N., Sapozhniko 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.
- [3] Скуратов Н.В. Снижение прочности и потемнение древесины при камерной сушке // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2010. № 4. С. 125–128.
- [4] Лыков А.В. Кинетика и динамика процессов сушки и увлажнения. Ленинград: Гизлегпром, 1938. 592 с.
- [5] Скуратов Н.В., Сапожников И.В., Самойленко Д.А., Алексеева И.И. Метод определения поверхностной влажности древесины // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2016. № 3. С. 66–71.
- [6] Скуратов Н.В., Сапожников И.В., Самойленко Д.А. Лабораторный стенд для исследования влагообмена капиллярно-пористых тел // Современный физический практикум, 2016. № 14. С. 186–189.
- [7] Rosenkilde A. Moisture content profiles and surface phenomena during drying of wood. Stockholm: Swedish Institute for Wood Technology Research, 2002, 36 p.
- [8] 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. SaintPeterburg: SPbGLTA, 2009, 119 p.
- [9] Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами товароведения. М.: МГУЛ, 2001. 340 с.
- [10] Peng L.M., Wang D., Fu F., Song B.Q. Analysis of wood pore characteristics with mercury intrusion porosimetry and x-ray micro-computed tomography // *Wood research*, 2015, no. 6, pp. 857–864.

## Сведения об авторах

**Скуратов Николай Владимирович** — канд. техн. наук, профессор кафедры процессов и аппаратов деревообрабатывающих производств МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), skuratov@mgul.ac.ru

Статья поступила в редакцию 22.05.2017 г.



## EFFECT OF SURFACE MOISTURE CONTENT ON EXTERNAL MASS EXCHANGE AT LOW-TEMPERATURE WOOD DRYING

N.V. Skuratov

BMSTU (Mytishchi branch), 1 st. Institutskaya, 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia  
skuratov@mgul.ac.ru

At the process of low-temperature drying, water movement from the inside to the wood surface occurs mainly under action of moisture gradient. The intensity of moisture removal from wood surface layers is determined by the conditions of its interaction with the drying agent. When drying the change in sizes, appearance and relative location of wood anatomical elements occur. Numerous studies in which modern methods of computed tomography and fluoroscopy have been used have shown that the greatest changes at drying occur in wood surface layers that are in direct contact with the drying agent. When mechanical treatment of wood occurs, a significant portion of surface cells are damaged in various degrees. During wood drying process both whole and damaged outer cells are deformed due to shrinkage. Diameters of microcapillaries in their walls gradually decrease. Accordingly, the total area of the capillary menisci from which water evaporates is reduced. In turn this leads to the change in the conditions of moisture exchange. In this paper it is shown that the intensity of moisture exchange depends not only on the air parameters, but also on the physical properties of wood: the basis density and the volume shrinkage coefficient. Dependences of the relative area of evaporation from the surface of pine and oak wood on moisture content are given. The obtained data will be used when determining the moisture exchange coefficients for low-temperature drying of wood of different species.

**Keywords:** wood drying, moisture exchange, surface moisture content, wood basis density

**Suggested citation:** Skuratov N.V. *Vliyaniye poverkhnostnoy vlazhnosti na vlagobmen pri nizkotemperaturnoy sushke drevesiny* [Effect of surface moisture content on external mass exchange at low-temperature wood drying]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 4, pp. 78–82. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-4-78-82

### References

- [1] Sapozhnikov I.V., Skuratov N.V., Alekseeva I.I., Samoilenko D.A., Mamontov M.P., Matveeva K.A. Opredelenie koeffitsientov vlagoprovodnosti pri nizkotemperaturnoy sushke drevesiny [Determination of moisture conductivity coefficients for low-temperature drying of wood] *Lesnoy vestnik/ Forestry Bulletin*, 2016, v. 20, no. 4, pp. 34–39.
- [2] Skuratov N., Sapozhniko 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.
- [3] Skuratov N.V. Snizhenie prochnosti i potemnenie drevesiny pri kamernoy sushke [Reduction of strength and darkening of wood at kiln drying] *Lesnoy vestnik/ Forestry Bulletin*, 2010, v. 14, no. 4, pp. 125–128.
- [4] Lykov A.V. Kinetika i dinamika protsessov sushki i uvlazhneniya [Kinetics and dynamics of drying and humidification processes], *Gizlegprom*, 1938, 592 p.
- [5] Skuratov N.V., Sapozhnikov I.V., Samoilenko D.A., Alekseeva I.I. Metod opredeleniya poverkhnostnoy vlazhnosti drevesiny [Method for determining the surface moisture of wood] *Lesnoy vestnik/ Forestry Bulletin*, 2016, v. 20, no. 3, pp. 66–71.
- [6] Skuratov N.V., Sapozhnikov I.V., Samoilenko D.A. Laboratornyy stend dlya issledovaniya vlagobmena kapillyarno-poristykh tel [Laboratory stand for the study of the moisture exchange of capillary-porous bodies], *Sovremennyy fizicheskiy praktikum [Modern physical practice]*, 2016, no. 14, pp. 186–189.
- [7] Rosenkilde A. Moisture content profiles and surface phenomena during drying of wood. Stockholm: Swedish Institute for Wood Technology Research, 2002, 36 p.
- [8] Skuratov N.V. Microstructure of wood surface and external mass transfer. /2009 IAWQ Plenary meeting and conference. Forest as a renewable source of vital values for changing world. 15–21 June 2009, Saint-Petersburg — Moscow, Russia. Saint-Petersburg: SPbGLTA, 2009, 119 p.
- [9] Ugolev B.N. Drevesinovedenie s osnovami tovarovedeniya [Wood Science with the Basics of Commodity Science], Moscow, MGUL publ., 2001, 340 p.
- [10] Peng L.M., Wang D., Fu F., Song B.Q. Analysis of wood pore characteristics with mercury intrusion porosimetry and x-ray micro-computed tomography. *Wood research*, 2015, no. 6, pp. 857–864.

### Author's information

**Skuratov Nikolay Vladimirovich** — Cand. Sci. (Tech.), Prof. BMSTU (Mytishchi branch),  
skuratov@mgul.ac.ru

Received 22.05.2017