

УДК 674.047

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.2.114

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА СУШКИ ПРОФИЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ДРЕВЕСИНЫ

П.В. Билей, д-р техн. наук, проф.

Р.А. Рокунь, асп.

Национальный лесотехнический институт Украины, ул. Генерала Чупринки, д. 103,
г. Львов, Украина, 79057; e-mail: p.biley@ukr.net, R525@ukr.net

Сушка профильных заготовок из массивной древесины имеет ряд особенностей. В первую очередь – это переменное сечение по длине заготовки, что ставит ряд сложных задач по формированию штабелей или пакетов, выбору режимов, технологий и сушильного оборудования. В качестве экспериментального материала выбрана древесина бука. Процесс сушки является сложным теплообменным процессом, включающим теплообмен между поверхностью древесины и средой, тепло- и влагопроводность внутри материала и испарение влаги на его поверхности. Для изучения теплообмена необходимо знать распределение влаги по сечению материала. В основном принимают для исследований или расчетов, что влага внутри материала распределяется по параболической или косинусоидальной зависимости. Косинусоидальная зависимость описывается уравнением скорости сушки в виде баланса влаги, которая перемещается внутри материала и испаряется с его поверхности. Полученная физико-математическая модель является исходным положением для составления методики экспериментальных исследований кинетики процесса сушки. Экспериментально необходимо определять влажность центральных и поверхностных слоев древесины, изменение средней влажности во время сушки, линейные размеры заготовок, режимные параметры процесса сушки (температура среды и равновесная влажность древесины). Представлены формулы, по которым определены коэффициенты сушки, влагопроводности, влагоотдачи, массообменные критерии Нуссельта и Фурье. По экспериментальным данным построены кривые сушки, отражающие изменение влажности древесины во время сушки, и кривые скорости сушки, на основании которых определяют кинетические характеристики процесса. Найдено, что скорость сушки в ходе эксперимента уменьшается более чем в шесть раз. Полученные значения коэффициентов сушки и влагопроводности можно использовать в теоретических уравнениях для определения продолжительности процесса сушки. Обобщающими характеристиками кинетики процесса сушки являются безразмерные критерии Нуссельта (характеризует соотношение коэффициентов влагоотдачи материала с характерным размером и влагопроводности) и Фурье (характеризует интенсивность перемещения влаги внутри древесных сортиментов).

Ключевые слова: древесина, влажность, коэффициенты сушки, влагопроводность, влагоотдача, критерии, кинетика.

Введение

В лесной, деревообрабатывающей и мебельной промышленности часто используют профильные заготовки из древесины. Это могут быть столярные изделия, декоративные элементы мебели, деревянные элементы стрелкового оружия, элементы деревянных музыкальных инструментов, деревянные протезы, обувные колодки и др. В последнее время имеется большой спрос на сухие дрова, идущие на экспорт и внутренний рынок. Режимам и технологии сушки профильных заготовок из древесины уделено очень мало внимания в специальной технической литературе. Профильные заготовки имеют переменное сечение по длине, поэтому возникают различные сложности по способам укладки в пакеты или штабеля, выбору режимов, технологий и сушильного оборудования.

В данной работе рассмотрен конвективный процесс сушки буковых сортиментов. Бук европейский (*Fagus sylvatica* L.) является наиболее распространенной порообразующей древесиной Карпатского региона Украины [1].

Теоретические положения

Внутренний влагоперенос и внешний влагообмен поверхности древесины с окружающей средой являются переменными величинами во времени и пространстве. Исследование конвективной сушки древесины твердых пород (бук, дуб, граб) показали, что более точно распределение влагосодержания в материале можно описать косинусоидой [1]. При трехмерном потоке влаги (например, для заготовок или дров) закон распределения влажности можно описать следующим уравнением:

$$U = U_{\text{пов}} + (U_{\text{ц}} - U_{\text{пов}}) \cos \frac{\pi x}{2R_1} \cdot \cos \frac{\pi y}{2R_2} \cdot \cos \frac{\pi z}{2R_3},$$

где $U_{\text{пов}}$, $U_{\text{ц}}$ – соответственно влагосодержание поверхностных и центральных слоев;

R_1, R_2, R_3 – соответственно толщина, ширина и длина заготовки, см.

Среднюю по объему влажность древесины определим по формуле

$$\bar{W} = \frac{1}{R_1 R_2 R_3} \int_0^{R_1} \int_0^{R_2} \int_0^{R_3} U dx \cdot dy \cdot dz.$$

Скорость сушки в данном случае найдем, используя уравнение

$$-\frac{dW}{dt} R_1 R_2 R_3 = a_m \left(\frac{\partial U}{\partial x} R_1 R_2 + \frac{\partial U}{\partial y} R_2 R_3 + \frac{\partial U}{\partial z} R_1 R_3 \right) = \beta (U_{\text{пов}} - U_{\text{п}}) (R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3),$$

где a_m – коэффициент влагопроводности;

β – коэффициент влагоотдачи;

$U_{\text{п}}$ – равновесное влагосодержание древесины [1, 3, 4, 6–8].

В конечном варианте запишем уравнение скорости сушки для периода убывающей скорости:

$$-\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{a_m}{R_c^2} \left[\frac{1}{C + \frac{\Pi}{R_c H}} \right] (\bar{W} - W_p),$$

где R_c – обобщенный характерный размер заготовок, $R_c = R^2 / R_a$;

$$\frac{1}{R^2} = \frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{R_2^2} + \frac{1}{R_3^2};$$

$$\frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3};$$

C, Π – постоянные коэффициенты, $C = 4/\pi^2 = 0,405$; $\Pi = 1,0$;

H – соотношение коэффициентов влагоотдачи β_c и теплопроводности a_m [2, 6];

W и W_p – соответственно средняя и равновесная влажность древесины.

Таким образом, для экспериментальных исследований кинетики процесса сушки необходимо иметь данные о средней влажности древесины (W), влажности поверхностных ($W_{\text{пов}}$) и центральных ($W_{\text{ц}}$) слоев древесины, линейных размерах заготовок (R_1, R_2, R_3), режимных параметрах процесса сушки (температура и равновесная влажность древесины) [2–9].

Методика экспериментального исследования

Как правило, поперечное сечение дров имеет вид треугольника или трапеции. Геометрический центр этих фигур находят по пересечению биссектрис или диагоналей. Для измерения влажности центральных слоев древесины датчики электроконтактного влагомера необходимо внедрить на глубину $x = R$. Для измерения влажности поверхностных слоев датчики достаточно внедрить на глубину $x = 0,15R$.

Перед процессом сушки (и в процессе сушки) контрольные образцы взвешивают – находят начальную (M_w) и среднюю текущую (M_i) массу образца (заготовки). Потом в середине образца выпиливают секции послойной влажности и секцию влажности, которые взвешивают и помещают в сушильный шкаф, где высушивают до абсолютно сухого состояния. Таким образом весовым способом находят распределение влажности по толщине заготовки в конце процесса сушки, а также массу (M_0 , кг), которую бы имела заготовка в абсолютно сухом состоянии:

$$M_0 = \frac{100M_w}{100 + W_n},$$

где W_n – средняя начальная влажность образца.

По массе заготовки в абсолютно сухом состоянии (M_0) можно воссоздать кинетику изменения средней влажности древесины во время сушки:

$$\bar{W}_i = \frac{M_i - M_0}{M_0} 100 \text{ \%}.$$

За основу были приняты известные режимы сушки [3, 4]. Фиксировались продолжительность процесса сушки на каждой из ступеней режима (τ , с), интервал времени ($\Delta\tau$, с) и изменение средней влажности древесины (ΔW , %). Средняя начальная влажность заготовок $W_n = 62,4$ %. Эквивалентный радиус заготовок $R = 5,2$ см.

Результаты экспериментальных исследований

В табл. 1 приведены данные экспериментов по изменению влажности древесины в процессе сушки, а также режимные параметры (ступень режима, равновесная влажность древесины (W_p), изменение влажности древесины (среднее ее значение (W), влажность поверхностных ($W_{пов}$) и центральных ($W_{ц}$) слоев древесины, продолжительность процесса (τ)).

Таблица 1

Изменение влажности древесины в процессе сушки

Параметры процесса, %		Продолжительность сушки		Влажность древесины в процессе сушки, %				Скорость сушки
W	W _p	$\tau \cdot 10^4$, с	$\Delta\tau \cdot 10^4$, с	W	W _ц	W _{пов}	ΔW	$\frac{\Delta W}{\Delta\tau} \cdot 10^{-4}$, %/с
		0	0	62,4	68,2	45,8	–	–
W _n ...40	13,5	5,76	5,76	39,9	49,0	28,6	22,5	3,91
40...30	9,0	10,80	4,32	30,3	36,6	18,9	9,6	2,22
30...20	7,0	16,20	6,12	20,0	25,4	12,7	10,3	1,68
20...15	4,5	25,20	9,0	14,8	15,6	8,2	5,2	0,58

Таблица 2

Кинетические характеристики процесса сушки

Параметры процесса, %		Коэффициенты			Критерии	
W	W _p	K _i , 1/с	a _m , см ² /с	$\beta_{с2}$, см/с	Nu _m	Fo _m
W _n ...40	13,5	$10,7 \cdot 10^{-6}$	$4,38 \cdot 10^{-4}$	$5,41 \cdot 10^{-5}$	0,64	0,93
40...30	9,0	$8,61 \cdot 10^{-6}$	$2,87 \cdot 10^{-4}$	$4,42 \cdot 10^{-5}$	0,80	0,46
30...20	7,0	$9,53 \cdot 10^{-6}$	$3,02 \cdot 10^{-4}$	$4,80 \cdot 10^{-5}$	0,83	0,68
20...15	4,5	$4,54 \cdot 10^{-6}$	$1,79 \cdot 10^{-4}$	$2,94 \cdot 10^{-5}$	0,81	0,60
Средние значения		$8,35 \cdot 10^{-6}$	$3,02 \cdot 10^{-4}$	$4,39 \cdot 10^{-5}$	0,77	0,68

В табл. 2 приведены кинетические характеристики процесса сушки, определенные по следующим формулам:

а) коэффициент сушки

$$K_i = \frac{1}{\tau_i} \ln \frac{W_n - W_p}{W_k - W_p},$$

где τ_i – продолжительность i -й ступени режима сушки, с;
 W_n, W_k – соответственно средняя начальная и конечная влажности древесины на данной ступени режима, %;
 W_p – равновесная влажность древесины на данной ступени режима, %;

б) коэффициент влагопроводности

$$a_m = \frac{\Delta W_i}{\Delta \tau_i} R / \frac{\Delta W}{\Delta x},$$

где $\Delta W_i / \Delta \tau_i$ – скорость сушки на данной ступени режима, %/с;

W_i – средняя влажность древесины на данной ступени режима, %;

R – характерный размер (эквивалентный радиус), см;

$\Delta W / \Delta x$ – перепад влажности по толщине материала, %/см;

в) коэффициент влагоотдачи

$$\beta_c = \frac{\Delta W}{\Delta \tau} R / (\bar{W}_i - W_p);$$

г) массообменный критерий Нуссельта, характеризующий соотношение влагопроводности древесины и влагообмена поверхности древесины со средой,

$$Nu_m = \beta_c R / a_m;$$

д) массообменный критерий Фурье, характеризующий интенсивность перемещения влаги внутри древесных сортиментов

$$Fo_m = a_m \tau / R^2.$$

Таким образом, построенные по экспериментальным данным кривые сушки (изменения влажности древесины во время сушки) и кривые скорости сушки дают возможность определить кинетические характеристики процесса в целом. Скорость сушки по ходу процесса уменьшается в 6,7 раз. Полученные значения коэффициентов сушки и влагопроводности можно использовать для определения длительности процесса. Обобщающими характеристиками процесса сушки являются безразмерные комплексы – критерии Нуссельта и Фурье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Билей П.В. Сушка древесины твердых лиственных пород. М.: Экология, 1992. 224 с.
2. Кейс В.М. Конвективный теплообмен: пер. с англ. М.: Энергия, 1972. 448 с.
3. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. Л.: Госэнергоиздат, 1963. 535 с.
4. Лыков А.В. Теплообмен: справ. 2-е изд.; пераб. и доп. М.: Энергия, 1978. 480 с.
5. Сушка древесины: справ. Серия «Деревообработка» / Сост. С.Ж. Алюшин, В.Ю. Березовский, П.В. Билей, С.А. Бурышев, Н.В. Приходько, С.А. Стрелков. К.: ТМА «Тристан», 2004. 440 с.
6. Шубин Г.С. Теория тепловой обработки и расчет процессов сушки древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 248 с.
7. Чудинов Б.С. Вода в древесине. Новосибирск: Наука, 1984. 270 с.
8. Билей П.В. І.В. Петришак, І.А. Соколовський, Л.Я. Сорока. Теплообмінні процеси деревообробки деревини (Підручник). Львів. 2013. 376 с.
9. Brunner – Hildebrand. Die schnitholz-trocknung (S. Auflage): Buchdruckwerkstaten. Hannover. Gm.bH, 1987. 322 s.

Поступила 08.02.15

UDC 674.047

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.2.114

Kinetics of Drying of Wood Profile Blanks

P.V. Biley, Doctor of Engineering Sciences, Professor

R.A. Rokun', Postgraduate Student

National Institute of Forestry of Ukraine, General Chuprynka str., 103, Lviv, 79057, Ukraine; e-mail: p.biley@ukr.net, R525@ukr.net

The drying process of profile blanks of solid wood has a number of features. First of all it is a variable cross-section along the length of a blank, which poses a number of challenges to form the staples or packages, to select the modes, technologies and drying equipment. The beechwood is selected as an experimental material, which is often used for firewood. The drying process is a complex process of heat and mass transfer which includes the heat exchange between the wood surface and the medium, thermal conductivity and moisture conduction inside the material, evaporation of moisture on its surface. To study the heat and mass transfer it is necessary to know the distribution of moisture in the cross section of material. Basically, the nature of moisture distribution inside the material is considered for the research in the form of a parabolic or cosine dependence. The cosine dependence is described by the drying rate law in the form of moisture balance. Moisture evaporates from the material surface. The resulting physical and mathematical model is the starting position for the methodology of the kinetics experimental studies of drying process. The moisture content of the central and surface layers of wood, change in the average moisture content at the drying process, linear dimensions of blanks, operational parameters of the drying process (the environmental temperature and the equilibrium moisture content of wood) are determined experimentally. The paper presents formulas, determining the coefficients of drying, moisture conduction, moisture-yielding ability, mass exchange Nusselt and Fourier numbers. According to the experimental data the drying curves reflecting the change in the moisture content during the drying process and the drying rate curves, which help to determine the kinetic characteristics of the process, should be constructed. The drying rate during the test is reduced by more than six times. The obtained values of drying and moisture coefficients can be used in the theoretical equations to determine the duration of the drying process. Kinetics general characteristics of drying process are dimensionless Nusselt and Fourier numbers.

Keywords: wood, moisture content, drying coefficient, moisture conduction, moisture-yielding ability, criteria, kinetics.

REFERENCES

1. Biley P.V. *Sushka drevesiny tverdykh listvennykh porod* [Wood Drying of Solid Hardwood]. Moscow, 1992. 224 p.
2. Kays W.M. *Convective Heat and Mass Transfer*. New York, 1966.
3. Lykov A.V., Mikhaylov Yu.A. *Teoriya teplo- i massopereenosy* [The Theory of Heat and Mass Transfer]. Leningrad, 1963. 535 p.
4. Lykov A.V. *Teplomassoobmen* [Heat and Mass Transfer]. Moscow, 1978. 480 p.

5. Alyushin S.Zh., Berezovskiy V.Yu., Biley P.V., Buryshv S.A., Prikhod'ko N.V., Strelkov S.A. *Sushka drevesiny* [Drying of Wood]. Kiev, 2004. 440 p.
6. Shubin G.S. *Teoriya teplovoy obrabotki i raschet protsessov sushki drevesiny* [Theory of Heat Treatment and Calculation Processes of Wood Drying]. Moscow, 1973. 248 p.
7. Chudinov B.S. *Voda v drevesine* [The Water in the Wood]. Novosibirsk, 1984. 270 p.
8. Biley P.V., Petrishak I.V., Sokolovs'kiy I.A., Soroka L.Ya. *Teplomassoobmini protsesi derevoobrobki derevini (Pidruchnik)* [Heat and Mass Transfer Processes of Wood Processing]. Lviv, 2013. 376 p.
9. Brunner-Hildebrand. *Die Schnittholz Trocknung*. Hannover, 1987. 322 p.

Received on February 08, 2015