



МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 674.047.38

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.5.132

**ОСОБЕННОСТИ СУШКИ ХВОЙНЫХ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ
ПРИ ПОНИЖЕННОМ ДАВЛЕНИИ СРЕДЫ**

А.А. Горяев, канд. техн. наук, доц.

В.И. Мелехов, д-р техн. наук, проф.

Н.Б. Баланцева, канд. техн. наук, доц.

О.А. Калиничева, канд. техн. наук, доц.

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,
наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002;

e-mail: ark16111936@gmail.com

Рассмотрен процесс конвективной сушки хвойных пиломатериалов при непрерывной циркуляции сушильного агента в условиях пониженного давления среды. Установлено, что заметное снижение скорости циркуляции сушильного агента в камере происходит при давлении среды 50 кПа и менее. Давление насыщения водяного пара в сушильной среде однозначно и логарифмически зависит от температуры, поэтому с понижением давления среды температура кипения воды снижается, коэффициенты диффузии и самодиффузии водяного пара, а также влагосодержание сушильной среды увеличиваются. В связи с этим определяется тепло- и массоперенос при пониженном давлении среды. Коэффициенты диффузии при пониженном давлении возрастают. Интенсивность процесса сушки в вакууме зависит от внутренней диффузии влаги к поверхности древесины. Влагосодержание сушильного агента, определяемое парциальным давлением водяного пара в вакуумной камере (автоклаве), увеличивается с понижением давления. Для интенсификации испарения влаги из древесины необходимо, чтобы температура древесины была равна температуре кипения влаги или превышала ее. Испаряясь, влага охлаждает поверхность древесины, в результате чего увеличивается внутренняя диффузия влаги к ее поверхности. Внутри древесины возникает избыточное давление, которое релаксируется в зависимости от ее гидравличе-

Для цитирования: Горяев А.А., Мелехов В.И., Баланцева Н.Б., Калиничева О.А. Особенности сушки хвойных пиломатериалов при пониженном давлении среды // Лесн. журн. 2016. № 5. С. 132–141. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.5.132

ского сопротивления. После релаксации давления в древесине температура насыщения будет ниже температуры влаги, и влага вскипает по всему объему древесины. Сушку проводят в вакуумной сушильной камере – автоклаве. Для конденсации водяного пара из сушильного агента корпус автоклава выполнен двойным в целях охлаждения водой. Сконденсированная в процессе сушки влага собирается в градуированную емкость с водомером. При начальной влажности пиломатериалов по объему конденсата можно определить текущую влажность древесины. Разовая вместимость автоклава – до 22 м³ пиломатериалов. Одновременно работают три автоклава. Использование пониженного давления среды в процессе конвективной сушки хвойных пиломатериалов на 13...26 ч снижает ее продолжительность. Процесс сушки контролируют с пульта управления по температуре древесины и состоянию среды в сушильной вакуумной камере.

Ключевые слова: сушка, пиломатериалы, вакуум, степень насыщенности, сушильный агент, перегретый пар, равновесное влагосодержание, диффузия, теплопроводность, циркуляция, давление.

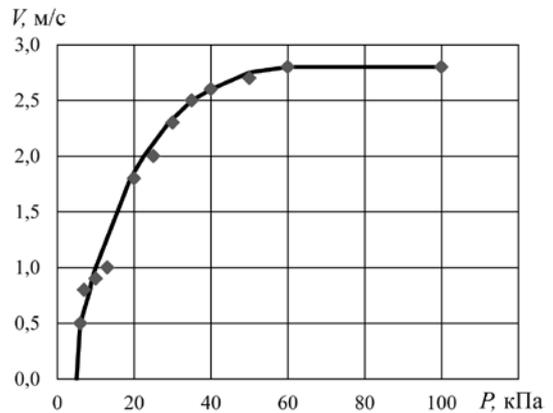
Комбинированная вакуумная сушка, как правило, применяется для качественного высушивания древесины твердых пород (дуб, бук, ясень, береза и др.). [2, 3, 8, 9, 13, 15, 16].

При вакуумной сушке используется ряд физических закономерностей, связанных с давлением. С понижением давления температура кипения влаги снижается, коэффициенты диффузии и самодиффузии, а также влагосодержание сушильной среды увеличиваются. С учетом этих явлений определяется тепло- и массоперенос при вакуумной сушке. Конвективный перенос тепла уменьшается, доля переноса тепла за счет теплопроводности возрастает. Возрастает и доля переноса тепла за счет молекулярной теплопроводности. Коэффициент диффузии при пониженном давлении увеличивается в несколько раз. Испарение в процессе сушки зависит от температуры и давления сушильной среды в вакуумной камере [1, 10–12, 14].

Вакуумная сушка обеспечивает высокое качество высушиваемых пиломатериалов. Она комбинируется с другими способами сушки и классифицируется как циклическая конвективно-вакуумная сушка, контактно-вакуумная сушка, радиационно-вакуумная сушка, вакуумно-диэлектрическая сушка [4].

Ниже рассмотрим конвективную сушку хвойных пиломатериалов при пониженном давлении и непрерывной циркуляции сушильного агента. Результаты проведенных опытов показали (рис. 1), что заметное снижение скорости (V) циркуляции воздуха в сушильной камере происходит, начиная с давления среды $P = 50$ кПа [11]. Для конвективной сушки при пониженном давлении ($P = 10...25$ кПа) скорость сушильного агента $V = 1...2$ м/с является оптимальной.

Рис. 1. График зависимости между давлением среды и скоростью циркуляции воздуха в камере



Испарение влаги из древесины будет происходить, если сушильная среда в камере будет представлять собой перегретый пар. Это произойдет в том случае, если степень насыщенности сушильного агента будет меньше 100 %. Температуре насыщения пара соответствует определенное давление насыщения. Графически зависимость различных температур насыщения (t) сушильного агента от давления показана на рис. 2.

Состояние перегретого пара характеризуется степенью насыщенности φ , или относительной упругостью пара. Степень насыщенности φ можно определить из соотношения давления пара и давления насыщения при данной температуре:

$$\varphi = \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{н}}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{п}}$ – парциальное давление пара в воздухе при температуре t , кПа;

$P_{\text{н}}$ – давление сухого насыщенного пара при той же температуре t , кПа.

Из (1) видно, что степень насыщенности φ прямо пропорциональна парциальному давлению пара.

Для нахождения параметров конвективной сушки при пониженном давлении среды необходимо знать характеристики насыщенного и перегретого пара для пониженных давлений [4].

Основные параметры ($P_{\text{п}}$, $P_{\text{н}}$, v , ρ , T , φ) определяются из известного уравнения Клапейрона и представлены на рис. 2:

$$Pv = R_{\text{п}} T, \quad (2)$$

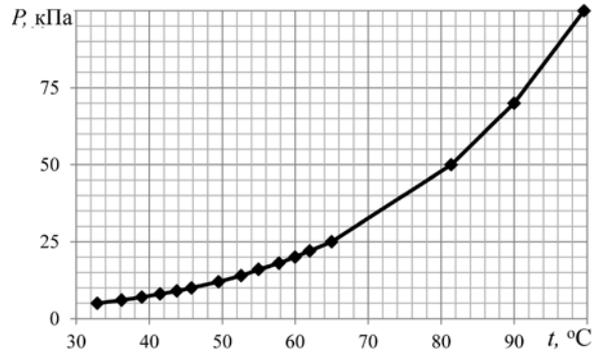
где P – давление, Па;

v – удельный объем, м³/кг;

$R_{\text{п}}$ – газовая постоянная водяного пара, $R_{\text{п}} = 461,6$ Дж/(кг·К);

T – температура, К.

Рис. 2. График зависимости между температурой и давлением насыщения водяного пара в диапазоне 5...100 кПа



Для определения параметров сушильного агента при давлении среды 93...107 кПа можно воспользоваться существующей Id -диаграммой. Однако при значительных отклонениях давления среды И.В. Кречетовым [7] предложено строить Id -диаграмму для соответствующего давления среды, т. е., не изменяя шкалы влагосодержания d , строить линии $\varphi = \text{const}$ отдельно для каждого барометрического давления среды. Координатная сетка из линий $I = \text{const}$, $d = \text{const}$ и $t = \text{const}$ остается без изменений. Таким образом строят объединенную Id -диаграмму для давления среды 5...100 кПа [6]. Для практического применения на рис. 3, 4 приведены диаграммы равновесного влагосодержания

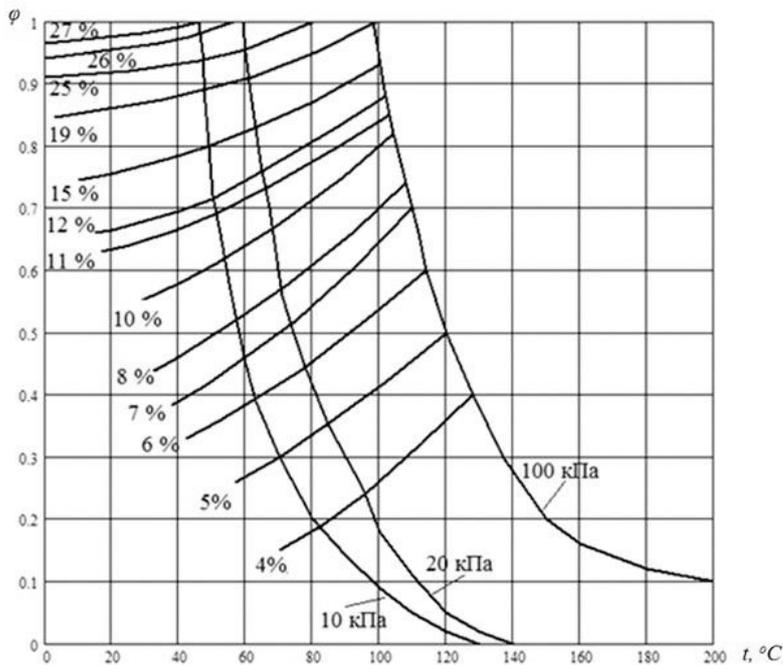


Рис. 3. Диаграмма равновесного влагосодержания древесины (%) при пониженном давлении среды

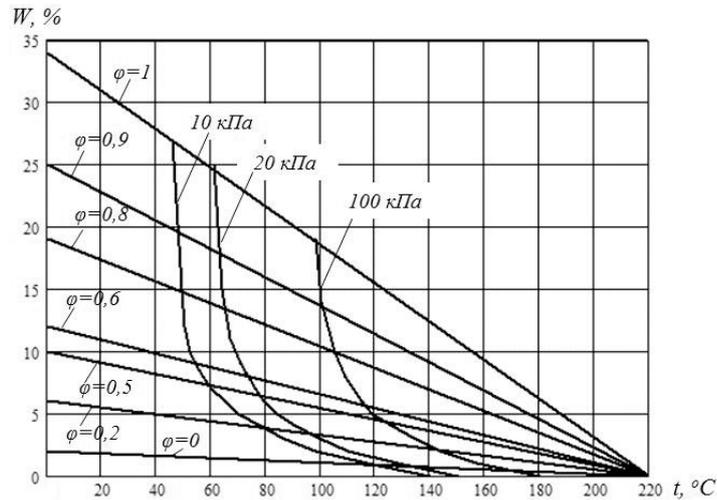


Рис. 4. Диаграмма равновесного влагосодержания древесины $W_p = f(t, \varphi)$ для $P_{\text{н}} = \text{const}$ и $\varphi = \text{const}$ при $P_{\text{ср}} < 100$ кПа

древесины $W_p = f(t, \varphi)$ с линиями $P_{\text{н}} = \text{const}$ ($< 0,1$ МПа) и $\varphi = \text{const}$, построенные по данным табл. 1, 2.

Т а б л и ц а 1

Зависимость равновесного влагосодержания (W_p) древесины от температуры (t), относительной влажности среды (φ) при $P_{\text{ср}} < 100$ кПа

$P = 100$ кПа			$P = 20$ кПа			$P = 10$ кПа		
$t, ^\circ\text{C}$	φ	$W_p, \%$	$t, ^\circ\text{C}$	φ	$W_p, \%$	$t, ^\circ\text{C}$	φ	$W_p, \%$
100	1,00	19	60	0,95	25	40	1,00	27
101	0,93	15	61	0,90	19	43	0,98	26
102	0,88	12	62	0,83	15	46	0,93	25
103	0,84	11	65	0,76	12	47	0,87	19
104	0,83	10	67	0,70	11	49	0,80	15
105	0,74	8	70	0,65	10	50	0,71	12
111	0,66	7	72	0,57	8	51	0,65	11
114	0,60	6	73	0,51	7	52	0,58	10
120	0,50	5	78	0,44	6	58	0,51	8
130	0,40	4	85	0,35	5	60	0,45	7
180	0,12	–	95	0,24	4	63	0,39	6
200	0,10	–	–	–	–	70	0,30	5

Т а б л и ц а 2

Зависимость равновесного влагосодержания ($W_p = f(t, \varphi)$) древесины для $P_{\text{н}} = \text{const}$ и $\varphi = \text{const}$ при $P_{\text{ср}} < 100$ кПа

$P_{\text{ср}} = 100$ кПа		$P_{\text{ср}} = 20$ кПа		$P_{\text{ср}} = 10$ кПа	
φ	$t, ^\circ\text{C}$	φ	$t, ^\circ\text{C}$	φ	$t, ^\circ\text{C}$
1,0	100	1,0	60	1,0	45
0,9	101	0,9	62	0,9	47
0,8	105	0,8	65	0,8	49
0,6	114	0,6	72	0,6	53
0,5	120	0,5	76	0,5	58
0,2	150	0,2	100	0,2	80

Предложенный метод сушки при пониженном давлении защищен патентом РФ и реализован в лесопильной промышленности [5].

Для сушки пиломатериалов использовали три вакуумные камеры в виде автоклавов диаметром 2,4 м и длиной 30 м с холодильником. Внутри камер (рис. 5) установлены два паровых калорифера 2, боковые экраны 5 и три вентиляторных отсека 4. В торце камеры устроен отдельный вентиляторный отсек 3. Электродвигатели 6 размещены снаружи автоклавов. В наружную рубашку автоклавов подается вода для охлаждения и конденсации испаренной из пиломатериала влаги. Между ложным потолком 7 и корпусом 1 устроен воздушный циркуляционный канал для возвращения сушильного агента в вентиляторный отсек 3. Вентиляторы реверсивные. Реверс разреженного сушильного агента производится автоматически через 1 ч. Сконденсированная влага собирается в процессе сушки, сливается в градуированную емкость. По известной начальной влажности пиломатериалов и объему конденсата определяется текущая влажность древесины. Разрежение в автоклаве создается вакуумным насосом.

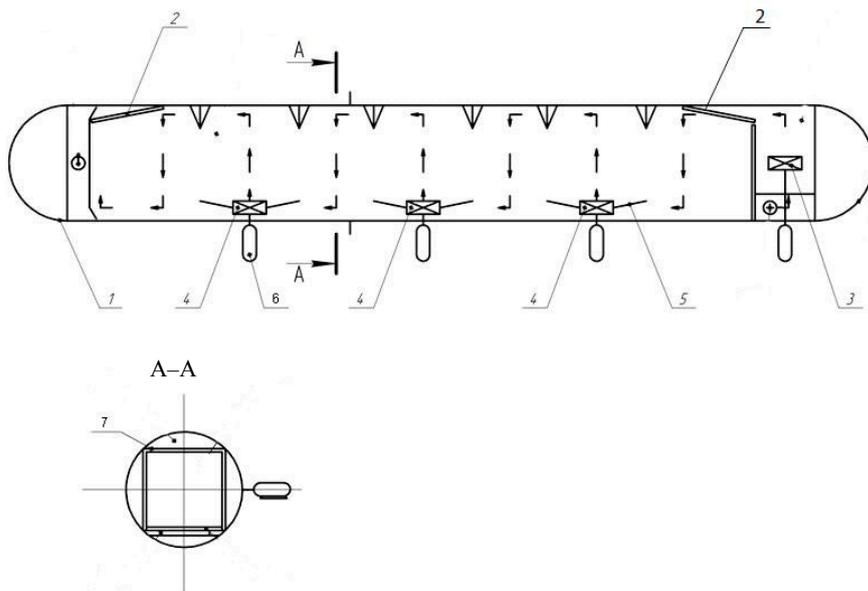


Рис. 5. Вакуумная камера

Пиломатериалы укладывают в сушильный штабель $1,2 \times 1,2$ м без шпаций на прокладки толщиной 25 мм. Перед автоклавом формируют поезд из 4–6 штабелей и по рельсам загружают их в автоклав. После загрузки из камеры откачивают воздух вакуумным насосом до остаточного давления 20 кПа. Одновременно калориферы нагревают среду в камере, включаются вентиляторы. Процесс сушки контролируют по состоянию среды и температуре древесины. Циркуляция агента сушки реверсивная, кольцо циркуляции замкнутое.

Продолжительность сушки хвойных пиломатериалов в вакуумных камерах существенно меньше, чем в конвективных. В табл. 3 приведены рассчитанные по [12] для конвективной сушки и фактические значения продолжительности сушки пиломатериалов в вакуумно-конвективной камере при давлении 20 кПа.

Определим продолжительность конвективного процесса сушки:

$$\tau_c = C_\tau B_1 C A_{\text{цр}} A_\phi \lg(W_n/W_k), \quad (3)$$

где τ_c – продолжительность сушки, ч;

C_τ – поправка на многомерность;

$$B_1 = \frac{S_1^2 K}{a'_m 10^6};$$

S_1 – толщина пиломатериалов, см;

K – коэффициент, зависящий от толщины S_1 ;

a'_m – коэффициент влагопроводности древесины, см²/с;

C – коэффициент замедления продолжительности сушки в штабеле по сравнению с сушкой единичных сортиментов;

$A_{\text{цр}}$ – коэффициент, учитывающий характер циркуляции (реверсивная, нереверсивная);

A_ϕ – коэффициент, учитывающий начальную степень насыщенности среды ϕ_n ;

W_n, W_k – начальная и конечная влажность древесины, %.

Т а б л и ц а 3

Расчет продолжительности сушки хвойных пиломатериалов

Сечение пиломатериала, мм	$W_n - W_k, \%$	$\phi, \%$	t_c	t_m	C_τ	B_1	C	$\lg \frac{W_k - W_p}{W_n - W_p}$	Продолжительность конвективной сушки при давлении среды	
									нормальном	пониженном
25×100	60–18	0,75...0,6	70	64	0,80	40	2,4	0,217	55	42
25×180	60–18	0,75...0,6	70	64	0,91	40	2,4	0,217	60	45
40×100	60–18	0,75...0,6	70	65	0,69	95	1,7	0,217	83	62
40×180	60–18	0,75...0,6	70	65	0,82	95	1,7	0,217	87	66
50×100	60–18	0,75...0,6	70	65	0,61	150	1,4	0,217	92	69
50×180	60–18	0,75...0,6	70	65	0,78	150	1,25	0,217	105	79

Примечание. t_c – температура по сухому термометру, °С; t_m – температура по мокрому термометру, °С.

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о том, что вакуумно-конвективная сушка дает возможность сократить продолжительность сушки на 13... 26 ч при неизменно высоком качестве высушиваемых пиломатериалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адриано Д. Особенности испарения воды со свободной поверхности и с поверхности древесины в условиях вакуумной сушки // Revista padurilor – industry lemnulei celuloza sihirti. RSR. 1980. Т. 31, № 3.
2. Лэмб Ф.М., Венгерт Ю.М. Оценка новых методов при сушке твердой древесины // Forest Industries. 1982. Т. 109, № 13. С. 21–22.
3. Герман Г. Вакуумная сушка – состояние техники и прогнозы на будущее // НОВ. 1980. № 4.
4. Горяев А.А. Современные вакуумные лесосушильные камеры: обзор. М.: ВНИПИЭИлеспром, 1985. 32 с.
5. Горяев А.А., Мелехов В.И. Установка для сушки древесины: а.с. 1983. Бюл. № 45. С. 164.
6. Горяев А.А., Попов Н.Ю. Определение параметров воздуха по *Id*-диаграмме при пониженном давлении // Сушка и защита древесины: науч. тр. Архангельск: ЦНИИМОД, 1985. С. 59–68.
7. Кречетов И.В. Сушка древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 432 с.
8. Ли Энди В.К., Харрис Р.А. Свойства пиломатериалов из древесины дуба красного, высушенных высокочастотным и конвективным методами // Forest Products J. 1984. Т. 34, № 5. С. 56–58.
9. Паньоци М. Вакуумная сушка древесины // Деревообаб. и мебел. пром-сть // НРБ. 1984. № 1.
10. Петухов С.В., Баланцева Н.Б., Горяев А.А. Конвективно-вакуумная сушка хвойных пиломатериалов // «Развитие Северо-Арктического региона: проблемы и решения»: материалы науч. конф. САФУ. Архангельск: ИД САФУ, 2015. С. 129–131.
11. Попов Н.Ю. Об особенностях комбинированной конвективно-диэлектрической сушки древесины при пониженном давлении среды // Сушка и защита древесины: науч. тр. Архангельск: ЦНИИМОД, 1985. С. 69–71.
12. Ривкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. М.: Энергия, 1980. 424 с.
13. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки пиломатериалов. Архангельск: Научдревпром–ЦНИИМОД, 2000. 125 с.
14. Серговский П.С. Гидротермическая обработка древесины. М.; Л.: Гослесбу-миздат, 1975. 400 с.
15. Харрис Р.А., Тарас М.А. Сравнение распределения влагосодержания, напряжения и усушки в пиломатериалах из древесины красного дуба при сушке с помощью вакуумно-высокочастотного процесса и в конвективной сушилке // Forest Products J. 1984. № 34(1). С. 44–54.

Поступила 26.05.16

UDC 674.047.38

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.5.132

Features of Softwood Lumber Drying Under Reduced Medium Pressure

A.A. Goryaev, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

V.I. Melekhov, Doctor of Engineering Sciences, Professor

N.B. Balantseva, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

O.A. Kalinicheva, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov,

Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation;

e-mail: ark16111936@gmail.com

The paper considers the convective drying of softwood lumber at the continuous circulation of a drying agent under low pressure. A noticeable rate reduction of the drying agent circulation takes place in the kiln at a pressure of 50 kPa and less. The water-vapor saturation pressure in the drying medium is uniquely and logarithmically dependent on a temperature. That is why the steam point reduces with decrease of a medium pressure. Moreover the diffusion and self-diffusion coefficients of water vapor and the moisture content of the drying medium increase. In connection with these phenomena, heat- and mass transfer under reduced medium pressure is determined. The diffusion coefficients under reduced pressure increase. The intensity of the vacuum drying process depends on the internal diffusion of moisture to the wood surface. The moisture content of the drying agent determined by the partial pressure of water vapor in a vacuum kiln increases with decreasing pressure. The temperature of wood should be equal to the boiling temperature or higher to intensify the evaporation of moisture from wood. The evaporating moisture cools the wood surface, and the internal diffusion of moisture to the wood surface increases. An overpressure occurs inside the wood, which relaxes depending on the hydraulic resistance of wood. After the relaxation of pressure in wood the saturation temperature is below of the moisture temperature, and moisture boils throughout the wood volume. A drying process is carried out in a vacuum drying kiln – an autoclave. The autoclave casing is doubled for water-cooling for condensation of water vapor from the drying agent. The condensed moisture is collected in a graduated container with a water meter. In the initial lumber moisture we can determine the current moisture content of wood by a condensate volume. The autoclave single occupancy is up to 22 m³ of sawn timber. Three autoclaves work at the same time. The use of a medium low-pressure in the process of convective drying of softwood lumber reduces its duration by 13...26 hours. The drying process is controlled by the remote control using the wood temperature and medium condition in a vacuum drying kiln.

Keywords: drying, timber, vacuum, degree of saturation, drying agent, superheated steam, equilibrium moisture content, diffusion, heat conduction, circulation, pressure.

For citation: Goryaev A.A., Melekhov V.I., Balantseva N.B., Kalinicheva O.A. Features of Softwood Lumber Drying Under Reduced Medium Pressure. *Lesnoy zhurnal*, 2016, no. 5, pp. 132–141. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.5.132.

REFERENCES

1. Adriano D. Osobennosti ispareniya vody so svobodnoy poverkhnosti i s poverkhnosti drevesiny v usloviyakh vakuumnoy sushki [Features of Water Evaporation from a Free Surface and a Wood Surface in a Vacuum Drying]. *Revista padurilor – industria lemnului celuloza si hartie – RSR*, 1980, vol. 31, no. 3.
2. Lamb F.M., Wengert E.M. Hardwood Drying Test Evaluates New Methods. *Forest Industries*, 1982, vol. 109(13), pp. 21–22.
3. Herman G. Vacuum Drying – State of the Art and Future Projections. *HOB*, 1980, no. 4.
4. Goryaev A.A. *Sovremennyye vakuumnyye lesosushil'nye kamery: obzor* [Modern Vacuum Wood-Drying Kilns: a Review]. Moscow, 1985. 32 p.
5. Goryaev A.A., Melekhov V.I. *Ustanovka dlya sushki drevesiny* [Apparatus for Wood Drying]. Certificate of Authorship, 1983. Bulletin no. 45, p. 164.
6. Goryaev A.A., Popov N.Yu. Opredelenie parametrov vozdukha po Id-diagramme pri ponizhenom davlenii [Defining of Air Parameters by the ID-Diagram under Reduced Pressure]. *Sushka i zashchita drevesiny* [Drying and Wood Protection]. Arkhangelsk, 1985, pp. 59–68.
7. Krechetov I.V. *Sushka drevesiny* [Wood Drying]. Moscow, 1980. 432 p.
8. Lee A.W.C., Harris R.A. Properties of Red Oak Lumber Dried by Radio-Frequency / Vacuum Process and Dehumidification Process. *Forest Products J.*, 1984, no. 34(5), pp. 56–58.
9. Panotstsi M. Vacuum Drying of Wood. *Woodworking and furniture industry*, 1984, no. 1.
10. Petukhov S.V., Balantseva N.B., Goryaev A.A. Konvektivno-vakuumnaya sushka khvoynykh pilomaterialov [Convective and Vacuum Softwood Lumber Drying]. *“Razvitiye Severo-Arkticheskogo regiona: problemy i resheniya”*: materialy nauch. konf. SAFU [“Development of the Northern Arctic Region: Problems and Solutions”: Proc. Conf. NArFU]. Arkhangelsk, 2015, pp. 129–131.
11. Popov N.Yu. Ob osobennostyakh kombinirovannoy konvektivno-dielektricheskoy sushki drevesiny pri ponizhenom davlenii sredy [On the Specifics of the Combined Convective and Dielectric Timber Drying under Medium Reduced Pressure]. *Sushka i zashchita drevesiny* [Drying and Wood Protection]. Arkhangelsk, 1985, pp. 69–71.
12. Rivkin S.L., Aleksandrov A.A. *Teplofizicheskie svoystva vody i vodyanogo para* [Thermal Properties of Water and Steam]. Moscow, 1980. 424 p.
13. *Rukovodyashchie tekhnicheskie materialy po tekhnologii kamernoy sushki pilomaterialov* [Reference Specification for Chamber Lumber Drying Technology]. Arkhangelsk, 2000. 125 p.
14. Sergovskiy P.S. *Gidrotermicheskaya obrabotka drevesiny* [Hydrothermal Treatment of Wood]. Moscow; Leningrad, 1975. 400 p.
15. Harris R.A., Taras M.A. Comparison of Moisture Content Distribution, Stress Distribution, and Shrinkage of Red Oak Lumber Dried by a Radio-Frequency / Vacuum Drying Process and a Conventional Kiln. *Forest Products J.*, 1984, no. 34(1), pp. 44–54.

Received on May 26, 2016