

УДК 674.047

И.М. Меркушев

Московский государственный университет леса

Меркушев Иван Михайлович родился в 1932 г., окончил в 1957 г. Московский лесотехнический институт, кандидат технических наук, профессор кафедры технологии мебели и изделий из древесины Московского государственного университета леса. Имеет свыше 100 печатных работ в области деревообработки и развития лесосушильной техники и технологии сушки древесных материалов.
Тел.: (8495) 512-75-92



КИНЕТИКА БЕЗДЕФЕКТНОЙ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

Выведены уравнения для расчета продолжительности сушки пиломатериалов; обоснованы принципы построения безопасных режимов конвективной сушки пиломатериалов; получены формулы для прогнозирования текущей влажности пиломатериалов в процессе сушки и графическая интерпретация безопасных режимов сушки пиломатериалов.

Ключевые слова: кинетика, полный период, бездефектная сушка, трансцендентные функции, психрометрическая разность, режимы.

Концепция построения и расчета безопасных режимов конвективной сушки пиломатериалов для повышения эффективности процесса дает возможность оценивать конечную влажность материала по состоянию сушильного агента и длительности процесса. Это требует простого и доступного метода оценки продолжительности безопасной сушки разных пиломатериалов при различных условиях.

В работе были поставлены следующие задачи:

разработать методы расчета продолжительности полного периода и режимов бездефектной сушки пиломатериалов, координированных по ее продолжительности;

построить диаграммы оптимальных режимов бездефектной сушки пиломатериалов основных древесных пород, координированных по продолжительности сушильного процесса.

Метод расчета продолжительности полного периода бездефектной сушки пиломатериалов

Вывод формул для расчета продолжительности полного периода бездефектной сушки пиломатериалов (T , сут) основан на отношении массы (M , кг) удаляемой из них влаги

$$M = 0,01 E \rho_6 \Delta W_{\tau_i} \quad (1)$$

к скорости ее перемещения (i , кг/с) изнутри к поверхности сортимента:

$$i = F \rho_0 a' du/dx. \quad (2)$$

Здесь E – объем партии высушиваемого материала, м³;
 ρ_6 и ρ_0 – плотность базисная и сухой древесины, кг/м³:

$$\rho_0 \approx 1,2 \rho_6; \quad (3)$$

ΔW_{τ_i} – снижение влажности сортимента в i -й фазе за время

T_i , %:

- в 1-й фазе, от начальной W_n до первой переходной W_{c_1} влажности:

$$\Delta W_{\tau_{0-1}} = W_n - W_{c_1} = \Delta W_s/3; \quad (4)$$

- во 2-й фазе простого режима сушки с учетом гистерезиса сорбции $\Delta W_k = 2,5$ %:

$$\Delta W_{\tau_{1-k}} = W_n - \Delta W_s/3 - 2,5; \quad (5)$$

- во 2-й фазе постоянной скорости сушки форс-режима:

$$\Delta W_{\tau_{1-2}} = W_{c_1} - W_{c_2} = W_n - \Delta W_v - \Delta W_s; \quad (6)$$

- в 3-й конечной фазе форс-режима:

$$\Delta W_{\tau_{2-k}} = 2/3 \Delta W_s + \Delta W_v - 2,5; \quad (7)$$

ΔW_s – перепад влагосодержания по толщине сортимента;

F – площадь поверхности испарения всех досок в штабеле, м²:

$$F = 2E/S; \quad (8)$$

S – расчетная толщина сортимента при ее реальных размерах a и b , м:

$$S = ab/(a + b); \quad (9)$$

a' – коэффициент влагопроводности древесины, определяемый по диаграммам П.С. Сергеевского [4] или по соответствующим им формулам автора [1], см²/с или м²/с:

- для заболони:

$$a'_z = 112\rho_6^{-4} t^2 \text{ или } 0,0112 t^2/\rho_6^4; \quad (10)$$

- для ядра:

$$a'_y = 76\rho_6^{-4} t^2 \text{ или } 0,0076 t^2/\rho_6^4; \quad (11)$$

- в среднем:

$$a' = 94\rho_6^{-4} t^2 \text{ или } 0,0094 t^2/\rho_6^4. \quad (12)$$

du/dx – средняя величина градиента влагосодержания древесины:

- в начальной фазе режима:

$$du/dx = 2/3 \cdot 0,01\Delta W_s : (0,1S) = 0,0666 \Delta W_s/S; \quad (13)$$

- в фазе стационарного режима:

$$du/dx = 0,01 \cdot 2/3 \cdot \Delta W_s : (S/5) = 0,0333 \Delta W_s/S; \quad (14)$$

- в конечной фазе сушильного процесса:

$$du/dx = 0,01 \cdot 1/3 \cdot \Delta W_s : (S/5) = 0,01666 \Delta W_s/S. \quad (15)$$

Преобразованием выражений (2)–(15) получены уравнения для расчета полной продолжительности сушильного процесса (T_i , с):

$$T_i = 0,01\Delta W_{\tau_i} \rho_6 E : (F\rho_0 a' (du/dx)) = 0,4433\rho_6^4 St^{-2} (\Delta W_{\tau_i} : (du/dx)). \quad (16)$$

При T в сутках и S в миллиметрах имеем

$$T_i = 5,13 \cdot 10^{-12} \rho_6^4 St^{-2} (\Delta W_{\tau_i} : (du/dx)). \quad (17)$$

Полная продолжительность сушильного процесса:

- начальной фазы:

$$T_{0-1} = 0,257 \cdot 10^{-10} \rho_6^4 (S/t)^2; \quad (18)$$

- конечной 2-й фазы:

$$T_{1-к} = 3,078 \cdot 10^{-10} \rho_6^4 (S/t)^2 (W_H - 2,5) / (\Delta W_s - 0,333); \quad (19)$$

- средней фазы:

$$T_{1-2} = 1,54 \cdot 10^{-10} \rho_6^4 (S/t)^2 (W_H - \Delta W_v - \Delta W_s) / \Delta W_s; \quad (20)$$

- конечной 3-й фазы:

$$T_{2-к} = 3,078 \cdot 10^{-10} \rho_6^4 (S/t)^2 (\Delta W_v - 2,5) / (\Delta W_s + 0,666). \quad (21)$$

Суммарная продолжительность сушильного процесса:

- простого:

$$T_{п} = T_{2ф} = (\rho_6/284)^4 (S/t)^2 [(2W_H - 5) / (\Delta W_s - 0,5)]; \quad (22)$$

- форс-процесса:

$$T_{ф} = T_{3ф} = (\rho_6/284)^4 (S/t)^2 [(W_H + \Delta W_v - 5) / (\Delta W_s + 0,5)]; \quad (23)$$

- оптимального:

$$T_o = T = (\rho_6/284)^4 (S/t)^2 (1,5W_H + 0,5\Delta W_v - 5) / \Delta W_s; \quad (24)$$

- или осредненного при $W_H \approx 70\%$ и $\Delta W_v = 6/v$:

$$T_o = (3v^{-1} + 100) 284^{-4} \rho_6^4 S^2 t^{-2} \Delta W_s^{-1}. \quad (25)$$

Метод расчета и построение режимов бездефектной сушки пиломатериалов, координированных по ее продолжительности

Характер снижения текущей влажности высушиваемого сортамента от начальной W_H до конечной W_K влажности в относительном времени

$$\theta = \tau/T \quad (26)$$

может быть описан трансцендентной функцией

$$W(\theta) = (W_H - W_K)^{2-3\theta^2}. \quad (27)$$

Для сушильного процесса в реальном времени (τ , сут) при конечной влажности, близкой к гистерезису сорбции $W_K = 2,5\%$, функция $W(\tau)$ из формул (25) – (27) принимает следующий вид:

$$W(\tau) = (W_H - 2,5)^{2-3 \left[\frac{284^4 t^2 S^{-2} \Delta W_s \tau}{\rho_6^4 (100+3v^{-1})} \right]^2} + 2,5. \quad (28)$$

Рациональное ведение процесса требует в целях обеспечения безопасности режима соблюдать величину допустимого перепада влажности по толщине сортамента, а в целях его интенсификации не стабилизировать равновесную влажность на определенных уровнях, как в стандартных ступенчатых режимах, а непрерывно снижать ее по мере уменьшения влажности сортамента по нижеприведенной формуле:

$$W_p(\tau) = \frac{(W_H - 6v^{-1} - \Delta W_s)}{W_H - 0,333\Delta W_s} W(\tau). \quad (29)$$

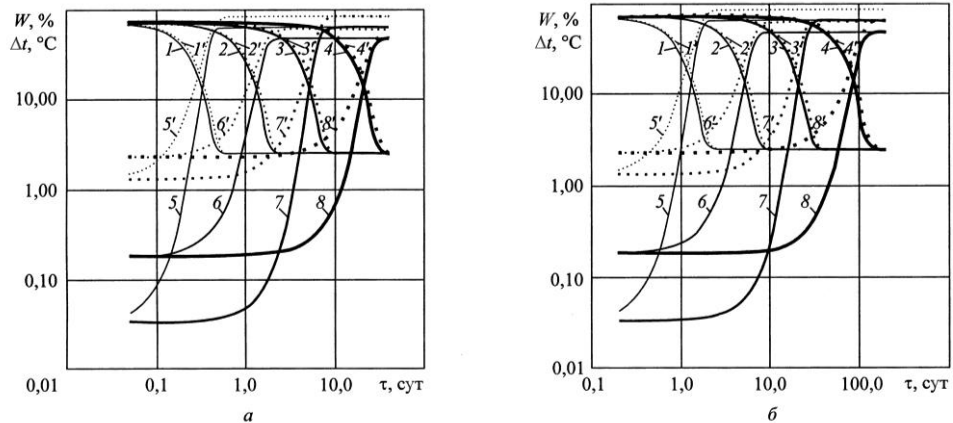
Совместным решением уравнений текущей $W(\tau)$ и равновесной $W_p(\tau)$ влажности и из формул (28) и (29) с использованием выражения [2]

$$\Delta t(W_{p,t}) = \left[\frac{\left(88 - 0,0025t \right)^{0,44-0,01t-W_p^{0,66+10^{-6},2,6}} \left(0,74+10^{-17} \cdot (146-t)^{7,77} \right)}{0,006 + 0,0000 \left(120-t \right)^{1,46}} \right] \quad (30)$$

получена функциональная зависимость режимной психрометрической разности сушильного агента от продолжительности процесса сушки $\Delta t(\tau) = \Delta t(t, S, \rho_6, x, v, W_s, W_H, \tau)$, представленная в развернутом виде следующей формулой:

$$\Delta t(\tau) = \frac{\left(1.88 - \frac{t}{400}\right)^{1.44} \cdot \frac{t}{91} \cdot \left[\frac{2.5 + (W_H - 2.5)^{2-3}}{\left(W_H - \Delta W_s \cdot \int_0^1 x^2 dx\right) \cdot \left(W_H - \Delta W_s \cdot \frac{6}{v}\right)^{-1}} \cdot \tau^2 \cdot \left(\frac{\rho_6^4 \cdot S^2 \cdot 100 + \frac{3}{v}}{284^4 \cdot t^2 \cdot \Delta W_s}\right)^{-2} \right]^{0.66 + \frac{t^{2.6}}{10^6}}}{0.006 + 0.00001 \cdot (120 - t)^{1.46}} \cdot \frac{1}{1.074 + \frac{(146-t)^{7.77}}{10^{17}}} \quad (31)$$

Построение режимов бездефектной сушки пиломатериалов, координированных по продолжительности процесса, приведено на рисунке (в логарифмической координатной сетке) в виде универсальных графиков оптимальных режимов сушки пиломатериалов разных пород с использованием формул (28) и (31).



Оптимальные режимы сушки еловых, кедровых, сосновых (а, $\rho_6 = 377 \text{ кг/м}^3$) и дубовых, буковых, ясеневых, кленовых, лиственничных (б, $\rho_6 = 533 \text{ кг/м}^3$) пиломатериалов ($W_H = 70 \%$; $\Delta W_s = 35 \%$; $x = 1$) при различных значениях t , S и v : 1, 1', 3, 3', 5, 5', 7, 7' – $t = 90 \text{ }^\circ\text{C}$; 2, 2', 4, 4', 6, 6', 8, 8' – $t = 45 \text{ }^\circ\text{C}$; 1, 1', 2, 2', 5, 5', 6, 6' – $S = 22,5 \text{ мм}$; 3, 3', 4, 4', 7, 7', 8, 8' – $S = 90,0 \text{ мм}$; 1 – 8 – $v = 2,4 \text{ м/с}$; 1' – 8' – $0,3 \text{ м/с}$

Продолжительность сушки (τ , сут) до заданной конечной влажности W_k рекомендуется прогнозировать по следующей формуле:

$$\tau = \frac{100 + 3v^{-1}}{t^2 S^{-2} \Delta W_s} \cdot \frac{\rho_6^4}{259^4} \log \left(2 - \frac{\log(W_k - 2,5)}{\log(W_H - 2,5)} \right)^{0,5}. \quad (32)$$

Данные режимы сушки прошли проверку в производственных условиях, в частности в тент-сушилках [3], и показали высокую эффективность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меркушев И.М. К вопросу построения режимов конвективной сушки пиломатериалов // Технология и оборудование для переработки древесины: Сб. науч. тр. – Вып. 335. – М.: МГУЛ, 2006.
2. Меркушев И.М. Психрометрическая диаграмма равновесной влажности древесины // Лесн. журн. – 2010. – № 3. – С. 90–93. – (Изв. высш. учеб. заведений).
3. Пат. 2170896 РФ. Способ сушки пиломатериалов / И.М. Меркушев. 29.12.1999.
4. Серговский П.С. Исследование влагопроводности и разработка методов расчета процесса сушки и увлажнения древесины: дисс. ... докт. техн. наук. – М., 1954.

Поступила 25.06.09

I.M. Merkushev
Moscow State Forest University

Kinetics of Defect-free Sawn Timber Drying

The equations for calculating the time of sawn timber drying are derived; the principles of building safe modes for convection drying are justified; the formulae are obtained for predicting the current moisture content of sawn timber in the drying process and graphical interpretation of the safe drying mode.

Keywords: kinetics, complete period, defect-free drying, transcendent functions, psychometric difference, modes.
