

Г. С. Шубин

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СУШКИ ПЛОСКИХ МАТЕРИАЛОВ И НОВЫЕ ЕЕ РЕЖИМЫ ДЛЯ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ

Московский государственный университет леса

I. Наиболее реальным способом интенсификации процесса сушки материалов является повышение температуры среды, сопровождаемое одновременным повышением степени ее насыщенности. Такой способ реализован при сушке в перегретом паре. Ранее (в 50-е годы) нами было доказано, что типичный процесс высокотемпературной сушки (на примере древесины) сопровождается повышением внутреннего избыточного давления водяного пара, стабилизацией температуры тела на уровне температуры кипения влаги и перемещением вглубь тела границы фазового перехода (кипения). Высокотемпературная сушка (в перегретом паре) начала в те годы внедряться в разных отраслях промышленности. Возникла задача разработки метода расчета продолжительности сушки такого процесса. В 1956 г. на Всесоюзной конференции по сушке материалов [1] нами был доложен приближенный метод расчета, основанный на составлении балансовых дифференциальных уравнений. Схема вывода расчетной формулы была следующей (рис. 1).

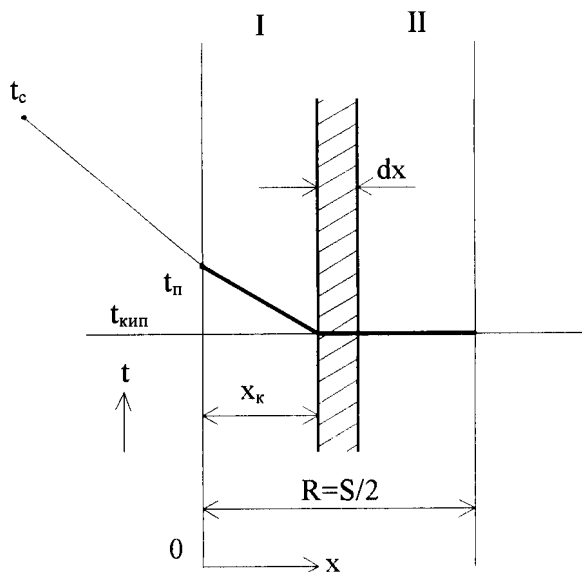


Рис. 1. Расчетная схема к выводу формулы (8)

Количество тепла, подводимого конвекцией из среды к поверхности образца, равно

$$\frac{dQ_1}{d\tau} = \alpha \cdot (t_c - t_{\text{п}}) \cdot dF. \quad (1)$$

В соответствии с экспериментальными данными температура по толщине материала в условиях выпаривания влаги после прогрева постоянна (рис. 1) и равна $t_{\text{кип}} \approx 100^\circ\text{C}$, а с другой стороны, на поверхности замедленно нарастает. С некоторой погрешностью такая обстановка в наружной подсушенной зоне близка к стационарной, в связи с чем количество тепла, подводимого к поверхности соприкосновения этой зоны с внутренней зоной, можно записать:

$$\frac{dQ_2}{d\tau} = \lambda \cdot \frac{(t_n - t_{\text{кип}})}{x_k} \cdot dx. \quad (2)$$

Температурные напоры из (1) и (2) будут:

$$(t_c - t_n) = \frac{dQ_1}{d\tau \cdot dF} \cdot \frac{1}{\alpha} \quad (3)$$

и

$$(t_n - t_{\text{кип}}) = \frac{dQ_2}{d\tau \cdot dF} \cdot \frac{x_k}{\lambda}. \quad (4)$$

Сложим оба выражения, чтобы исключить изменяющуюся величину t_n . Учитывая, что при описанных допущениях $Q_1 = Q_2 = Q$ (и, следовательно, критерий фазового превращения $\varepsilon = 1.0$), получим

$$(t_c - t_{\text{кип}}) = \frac{dQ}{d\tau \cdot dF} \cdot \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{x_k}{\lambda} \right). \quad (5)$$

Тепло, пошедшее на кипение Q в зоне dx (с учетом стационарности процесса)

$$\frac{dQ}{d\tau} = \frac{(W_n - W_k) \cdot \rho_0 \cdot r_{\text{кип}}}{100} \cdot dF \cdot \frac{dx}{d\tau}. \quad (6)$$

Приравняв уравнения (5) (после решения относительно $\frac{dQ}{d\tau}$) и (6) и разделив переменные, получим

$$d\tau = \frac{(W_n - W_k) \cdot \rho_0 \cdot r_{\text{кип}}}{100 \cdot (t_c - t_{\text{кип}})} \cdot \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{x_k}{\lambda} \right) \cdot dx. \quad (7)$$

После интегрирования в пределах $0 - R$ (полное выкипание свободной влаги) и имея в виду, что $S = 2 \cdot R$, найдем:

$$\tau = \frac{(W_n - W_{\text{пер}}) \cdot \rho_0 \cdot r_{\text{кип}} \cdot S}{200 \cdot (t_c - t_{\text{кип}})} \cdot \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{S}{4 \cdot \lambda} \right). \quad (8)$$

Формула (8) была рекомендована Ю. А. Михайловым в его монографии “Сушка перегретым паром” /2/ для расчета продолжительности высокотемпературной сушки различных материалов. Она дает длительность процесса при выкипании всей свободной влаги. Для расчета продолжительности сушки при неполном ее удалении (до конечной влажности W_k) из уравнения (7) можно получить:

$$\tau = \frac{(W_n - W_{пер}) \cdot \rho_0 \cdot r_{кип} \cdot S}{200 \cdot (t_c - t_{кип})} \cdot \frac{x_k}{R} \cdot \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{S}{4 \cdot \lambda} \cdot \frac{x_k}{R} \right). \quad (9)$$

Связь между $\frac{x_k}{R}$ и средней по сечению влажностью определяем из условия, что выкипание происходит слоями при неизменной влажности в середине пластины. Тогда

$$\frac{x_k}{R} = \frac{W_n - W_k}{W_n - W_{пер}}. \quad (10)$$

Отсюда выражение для τ при $W_k > W_{пер}$ запишем как

$$\tau = \frac{(W_n - W_k) \cdot \rho_0 \cdot r_{кип} \cdot S}{200 \cdot (t_c - t_{кип})} \cdot \left[\frac{1}{\alpha} + \frac{S}{4 \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{W_n - W_k}{W_n - W_{пер}} \right) \right]. \quad (11)$$

Если ввести критерий Коссовича по соотношению

$$Ko_{кип} = \frac{\rho_0 \cdot (W_n - W_{пер}) \cdot r_{кип}}{100 \cdot (t_c - t_{кип}) \cdot c \cdot \rho}, \quad (12)$$

то из (9) следует

$$\tau = Ko_{кип} \left[\frac{1}{Bi} \cdot \frac{x_k}{R} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x_k}{R} \right)^2 \right]. \quad (13)$$

Дальнейший анализ позволил получить формулу для расчета продолжительности высокотемпературной сушки из приближенного решения системы уравнений тепломассопереноса (фактически из уравнения температурного поля с внутренним стоком тепла) при известной аппроксимации между температурой и влажностью тела. Простейшая система уравнений при соответствующих граничных условиях имеет вид /3/

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \varepsilon \cdot \frac{r}{c} \cdot \frac{du}{d\tau}, \quad (14)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a' \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (15)$$

$$\alpha \cdot (t_c - t_n) = -\lambda \cdot \left(\frac{dt}{dx} \right)_n + r \cdot (1 - \varepsilon) \cdot q', \quad (16)$$

$$\alpha' \rho_0 \cdot (u_n - u_p) = -a' \cdot \rho_0 \cdot \left(\frac{du}{dx} \right)_n. \quad (17)$$

Приближенное решение уравнения (14) ($Fo > Fo_1$) при условии (16), найденное при подстановке в (14) вместо $\frac{\partial u}{\partial \tau}$ решения уравнения (15) при условии (17), получено в виде [3/

$$\frac{t(x, \tau) - t_n}{t_c - t_n} = 1 - \frac{q'(x, \tau) \cdot R \cdot r}{\rho \cdot c \cdot a \cdot (t_c - t_n)} \cdot \left[\frac{\varepsilon}{2} \cdot \left(1 - \frac{x^2}{R^2} \right) + \frac{1}{Bi} \right]. \quad (18)$$

Из рассмотрения зависимостей между температурой и влажностью на примере древесины видно, что в типично высокотемпературных и квазивысокотемпературных процессах наиболее характерна связь $t_u = f(\bar{u})$. В связи с этим представляет интерес решение уравнения (18) для середины пластины. После некоторых подстановок оно примет вид

$$t_u = t_c - \frac{d\bar{u}}{d\tau} \cdot \frac{R^2 \cdot r \cdot \rho_0}{\lambda} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{2} + \frac{1}{Bi} \right). \quad (19)$$

Разделив переменные, получим

$$d\tau = \frac{R^2 \cdot \rho_0 \cdot r_0}{\lambda \cdot (t_c - t_u)} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{2} + \frac{1}{Bi} \right) \cdot d\bar{u}. \quad (20)$$

Интегрирование уравнения (20) при постоянных теплокоэффициентах и критерии ε возможно либо при независимости величины t_u от влажности тела, либо при наличии известной зависимости между ними. Тогда при типичном высокотемпературном процессе (в т. ч. при сушке в перегретом паре), когда t_u - линейная функция влажности [4/], будем иметь: первый период - удаление (выкипание) свободной влаги. Критерий Био не стремится к бесконечности (граничные условия 3-го рода), $t_u \approx t_{кип}$ и, как принято было выше, $\varepsilon \rightarrow 1$. Тогда интегрирование уравнения (20) после преобразований дает выражение

$$\tau = \frac{S \cdot \rho_0 \cdot r_0 \cdot (W_n - W_{пер})}{200 \cdot (t_c - t_{кип})} \cdot \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{S}{4 \cdot \lambda} \right), \quad (8')$$

которое точно совпало с уравнением (8), выведенным из балансовых дифференциальных уравнений. Отсюда очевидно, что допущения, принятые при выводе формулы (8) и (8'), одни и те же и их желательно оценить, что и будет сделано ниже. Нетрудно видеть, что отмеченные в начале доклада особенности

высокотемпературного процесса сушки по своему физическому содержанию близки к задаче Стефана, использование которой представляет собой более высокий, чем рассмотренные выше, уровень подхода к расчету процесса. Поэтому в последнее время нами было получено решение вопроса на этой основе. Воспроизведем его в краткой форме.

Дифференциальные уравнения теплопереноса (именно этим процессом определяется высокотемпературная сушка) в каждой из зон пластины по толщине имеют вид:

$$c_1 \cdot \rho_1 \cdot \frac{\partial t_1}{\partial \tau} = \lambda_1 \cdot \frac{\partial^2 t_1}{\partial x^2}, \quad (21)$$

$$c_2 \cdot \rho_2 \cdot \frac{\partial t_2}{\partial \tau} = \lambda_2 \cdot \frac{\partial^2 t_2}{\partial x^2}. \quad (22)$$

Граничные и начальные условия:

$$\alpha \cdot [t_c - t_1(0, \tau)] = -\lambda_1 \cdot \left. \frac{\partial t_1}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad (23)$$

$$t_2(x, 0) = f(x), \quad (24)$$

$$\left. \frac{\partial t_2}{\partial x} \right|_{x=R} = 0, \quad (25)$$

$$t_1(x_k, \tau) = t_{\text{кип}} = \text{const}. \quad (26)$$

Дифференциальное условие Стефана на границе зон будет /5/

$$r_{\text{кип}} \cdot \rho_{\text{кип}} \cdot \frac{\partial x_k}{\partial \tau} = \lambda_2 \cdot \left. \frac{\partial t_2}{\partial x} \right|_{x=x_k} - \lambda_1 \cdot \left. \frac{\partial t_1}{\partial x} \right|_{x=x_k}. \quad (27)$$

Для получения приближенного решения задачи (21) – (27) применим метод аппроксимации температурных кривых в каждой из зон их аналогами, предложенный Л.С. Лейбензоном /6/ (точное решение задачи Стефана из-за подвижной границы для пластины отсутствует). При этом для того, чтобы уменьшить погрешности, которые могут возникнуть при подстановке в условие (27) производных от температурных полей в точке фазового перехода ($x = x_k$), преобразуем дифференциальное условие Стефана (27) в интегральное условие, включающее производные на поверхности. Для этого после некоторых преобразований интегрируются обе части уравнения (21) в пределах $0 \dots x_k$ и уравнения (22) в пределах $x_k \dots R$ (выкладки опускаем). Из полученных уравнений находятся градиенты температуры при $x = x_k$, выражения которых подставляются в условие Стефана (27). После преобразований получаем интегральное условие Стефана

$$\lambda_1 \cdot \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = - \left[c_1 \cdot \rho_1 \int_0^{x_k} \frac{\partial t_1}{\partial x_k} dx + c_2 \cdot \rho_2 \cdot \int_{x_k}^R \frac{\partial t_2}{\partial x_k} dx + r_{кип} \cdot \rho_{кип} \right] \frac{dx_k}{d\tau}. \quad (28)$$

Дальнейшая задача состоит в интегрировании уравнения (28) для определения длительности достижения границей фазового перехода заданной координаты x_k .

В различных случаях тепломассопереноса (тип процесса, род и размеры материала и др.) температурные поля могут иметь различный характер, в связи с чем представляет интерес получение приближённого решения задачи (21) - (27) при условии, что эти поля в каждой из зон задаются в обобщённом виде, например в виде параболических кривых степени n_1 и n_2 , информация о которых сохраняется в конечном решении. Это даёт возможность использовать полученное решение для различных случаев.

Температурные поля в зонах 1 и 2 могут быть записаны в виде

$$\frac{t_1 - t_{кип}}{t_n - t_{кип}} = \left(\frac{x_k - x}{x_k} \right)^{n_1}, \quad (29)$$

$$\frac{t_2 - t_{цт}}{t_{кип} - t_{цт}} = \left(\frac{R - x}{R - x_k} \right)^{n_2}. \quad (30)$$

Исключив в результате некоторых подстановок величины t_n и $t_{цт}$, несложно получить уравнения температурных кривых в зонах 1 и 2, дифференцируя которые находим выражения для $\frac{\partial t_1}{\partial x_k}$, $\frac{\partial t_2}{\partial x_k}$ и $\frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{x=0}$.

Подставив далее их в интегральное условие Стефана (28), получаем выражение $\partial \tau = f(dx_k)$, частное решение которого при $x_k = 0$ позволяет записать формулу для определения длительности процесса [7]:

$$\tau = \frac{R^2}{\lambda_1 \cdot (t_c - t_{кип})} \cdot [\rho_{кип} \cdot r_{кип} \cdot K_1 + c_1 \cdot \rho_1 (t_c - t_{кип}) \cdot K_2 + c_2 \cdot \rho_2 (t_{кип} - t_{цт}) \cdot K_3]. \quad (31)$$

Здесь K_1 , K_2 и K_3 – безразмерные комплексы:

$$K_1 = \frac{1}{2 \cdot n_1} \cdot \left(\frac{x_k}{R} \right)^2 + \frac{1}{Bi_1} \cdot \frac{x_k}{R}, \quad (32)$$

$$K_2 = \frac{1}{2 \cdot n_1 (n_1 + 1)} \cdot \left(\frac{x_k}{R} \right)^2 + \frac{1}{(n_1 + 1) \cdot Bi_1} \cdot \left\{ \frac{x_k}{R} - \frac{n_1}{Bi_1} \cdot \left[\ln \left(\frac{Bi_1}{n_1} \cdot \frac{x_k}{R} + 1 \right) \right] \right\}, \quad (33)$$

$$K_3 = \left(\frac{x_k}{R} \right)^2 \cdot \left(1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{x_k}{R} \right) \cdot \frac{n_2}{n_1 \cdot (n_2 + 1)} + \frac{2 \cdot n_2}{(n_2 + 1) \cdot Bi_1} \cdot \frac{x_k}{R} \cdot \left(1 - \frac{x_k}{2 \cdot R} \right). \quad (34)$$

Выражение (31) представлено в виде, в котором слагаемые в квадратной скобке сгруппированы таким образом, что характеризуют соответственно затраты тепла на фазовые превращения в единице объёма и изменение энтальпии в зонах 1 и 2. Оно может быть записано в критериальном виде:

$$Fo = (Ko_{\text{кип}} \cdot K_1 + K_2 + \Pi_{\text{кип}} \cdot K_3). \quad (35)$$

Здесь критерий Коссовича определяется по уравнению (12), а введённый нами безразмерный параметр $\Pi_{\text{кип}}$, характерный для процессов, сопровождаемых движением границы фазовых превращений, по уравнению

$$\Pi_{\text{кип}} = \frac{c_2 \cdot \rho_2 (t_{\text{кип}} - t_{\text{ц0}})}{c_1 \cdot \rho_1 (t_c - t_{\text{кип}})}. \quad (36)$$

Он показывает соотношение между расходами тепла на нагревание (охлаждение) тела в одной зоне от начальной температуры $t_{\text{ц0}}$ до температуры фазового перехода $t_{\text{ф}}$ и в другой зоне от $t_{\text{ф}}$ до температуры среды t_c .

Как явствует из выражений (32) - (34), для того чтобы рассчитать длительность процесса, необходимо располагать значениями n_1 и n_2 . Показатель степени параболы n_2 во внутренней зоне (в которой ещё не выкипела вода), как и при обычном процессе нагрева, принимается равным двум.

Что касается наружной зоны, в которой уже произошёл фазовый переход, то здесь, как показывают непосредственные эксперименты и расчёты на ЭВМ, температурные кривые близки к линейным, что подтверждается и аналитически. Выражения для n_1 , полученные для полуограниченного тела /8/, которому можно уподобить пластину в начальный период времени, имеет вид

$$n_1 = -\frac{1}{2} \left(1 - \frac{m^2}{2 \cdot a_1 \cdot Ko} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left(1 - \frac{m^2}{2 \cdot a_1 \cdot Ko} + \frac{m^2 \cdot (1 + Ko)}{2 \cdot a_1 \cdot Ko} \right)}. \quad (37)$$

Скорость заглубления зоны фазового перехода m ($\text{м/с}^{1/2}$) была определена графоаналитическим решением трансцендентного уравнения /8/ для условий кипения:

$$\frac{\lambda_1 \cdot (t_c - t_{\text{кип}})}{\sqrt{a_1} \cdot \operatorname{erf} \frac{m}{2 \cdot \sqrt{a_1}}} \cdot \exp \left(-\frac{m^2}{4 \cdot a_1} \right) = \frac{r_{\text{кип}} \cdot \rho_{\text{кип}} \cdot \sqrt{x_k} \cdot m}{2}. \quad (38)$$

Для высокотемпературного процесса (на примере сушки пластины из сосны и берёзы при $t_c = 120^\circ \text{C}$, $W_n = 80\%$, $W_{\text{пер}} = 15\%$) $Ko_{\text{кип}}$ соответственно 29.43 и 25.04. По (38) получилось /7/ $m = 0.00012$ и 0.0001 , а по уравнению (37) средние значения $n_1 = 1.007$, т.е. практически $n_1 = 1.0$.

Полученные выражения (31) - (35) при $n_1 = 1$ и $n_2 = 2$ конкретизируются.

Представим формулу (35) в развёрнутом виде (после подстановки значений K_i из (32) - (34)):

$$\begin{aligned}
Fo = & Ko_{\text{кип}} \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot n_1} \cdot \left(\frac{x_k}{R} \right)^2 + \frac{1}{Bi_1} \cdot \frac{x_k}{R} \right) + \frac{1}{2 \cdot n_1 (n_1 + 1)} \cdot \left(\frac{x_k}{R} \right)^2 + \frac{1}{(n_1 + 1) \cdot Bi_1} \times \\
& \times \left\{ \frac{x_k}{R} - \frac{n_1}{Bi_1} \cdot \left[\ln \left(\frac{Bi_1}{n_1} \cdot \frac{x_k}{R} + 1 \right) \right] \right\} + \\
& + \Pi_{\text{кип}} \cdot \left[\left(\frac{x_k}{R} \right)^2 \cdot \left(1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{x_k}{R} \right) \cdot \frac{n_2}{n_1 \cdot (n_2 + 1)} + \frac{2 \cdot n_2}{(n_2 + 1) \cdot Bi_1} \cdot \frac{x_k}{R} \cdot \left(1 - \frac{x_k}{2 \cdot R} \right) \right].
\end{aligned} \quad (39)$$

Первый член в этом уравнении характеризует затраты тепла на фазовый переход, второй и третий - затраты на нагревание пластины в наружной зоне, четвёртый - на нагревание тела во внутренней зоне до температуры фазового перехода $t_{\text{кип}}$. Из 1-го члена уравнения (39) вытекает формула (9), которая при полном окончании процесса выпаривания влаги ($\frac{x_k}{R} = 1$) дает формулу (8), т. е. получаем те формулы,

которые были получены выше другими методами: из балансовых дифференциальных уравнений и из приближенной системы уравнений тепломассопереноса, когда принимались различные допущения. Наличие формулы (39) позволяет количественно оценить эти допущения. Для этого оценим влияние членов 2, 3 и 4 на общую сумму, т.е. на общую длительность процесса. Возьмём типовой пример: берёзовая доска, $\rho_0 = 500 \text{ кг/м}^3$, $W_n = 80 \%$, $W_{\text{пер}} = 15 \%$, $t_n = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\omega = 2 \text{ м/с}$, $t_c = 120 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 100 \text{ }^\circ\text{C}$. Это даёт $\alpha = 26.5 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, $Ko_{\text{кип}} = 25.08$ и $\Pi_{\text{кип}} = 1.97$. Сведём результаты расчётов в табл. 1 (принято в соответствии с изложенным выше: $n_1 = 1$; $n_2 = 2$).

Таблица 1

К оценке членов в формуле (39)

x_k/R	Составляющие формулы (3а)					
	I (Fo_1)	II	III	IV	$Fo_{\text{общ}}$	$Fo_{\text{общ}}/Fo_1$
0.2	2.8666	0.07	0.008	0.23	3.1146	1.086
0.6	11.612	0.09	0.05	0.804	12.556	1.081
1.0	24.4	0.15	0.108	1.056	25.87	1.057

Из таблицы видно, что наименьшая погрешность при пренебрежении членами II, III, VI, т. е. при принятии формулы, основанной на I члене уравнения (39), получается в наиболее важном случае – полное окончание процесса выкипания ($\frac{x_k}{R} = 1$) – 5.7 %.

Отметим лишь, что при формулировке задачи Стефана (21) - (23) и, следовательно, при получении формулы (39) присутствует еще одно допущение: принимается, что вся влага выкипает внутри пластины (критерий фазового перехода $\varepsilon = 1$). Это близко к истине и подтверждается рядом экспериментов /4/. И если в соответствии с данными одной из последних работ /9/ значение ε при высокотемпературной сушке составляет примерно $\varepsilon = 0.75$, то принятие вместо этой величины значения $\varepsilon = 1.0$ (при ε не стремящемся к 1 в формулах (8) и (9) вместо $\frac{S}{4\lambda}$ будет $\frac{\varepsilon S}{4\lambda}$) дает допустимую погрешность δ : при толщине пластины $S = 25 \text{ мм}$ – 6,3 %, а при $S = 50 \text{ мм}$ – 10,7 %.

II. Рекомендуемые в настоящее время режимы высокотемпературной сушки пиломатериалов предусматривают поддержание среды перегретого пара на всем протяжении процесса /10, 11/. Выполненное нами исследование показало, что такой вариант процесса далек от рационального. Были проведены сравнительные исследования сушки в перегретом паре (температура смоченного термометра $t_m = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) и в паровоздушной среде ($t_m < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) на всем протяжении процесса при одинаковых температурах среды, а также вариант, при котором на первом этапе сушки (в диапазоне влажности $\Delta W = W_n - 25\%$) использовался перегретый пар, а на втором этапе ($\Delta W = 25 - 8\%$) – паровоздушная среда. Опуская цифровые данные, отметим лишь конечные выводы. Вариант с переменной вида агента сушки оказался для пиломатериалов толщиной $S = 40\text{ мм}$ (сосна и береза) наиболее предпочтительным. Перегретый пар на первом этапе обеспечивает более раннее наступление типичного высокотемпературного процесса (достижение сырым материалом температуры $t = t_{\text{кип}} \approx 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ее стабилизация на этом уровне) и, следовательно, большую скорость процесса. На втором этапе процесса, после того, когда практически вся свободная влага уже выкипела, при любом значении t_m имеет место не типичный высокотемпературный, а квазивысокотемпературный процесс, т. е. процесс при температуре материала выше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, но без ее стабилизации на уровне $t = t_{\text{кип}}$ и без молярного влагопереноса. В этих условиях ускорению процесса сушки будет способствовать более низкая степень насыщенности паровоздушной среды ϕ (по сравнению с насыщенностью перегретого пара). Кроме того, вариант с переменной вида агента сушки лучше согласовывается с расходом пара для поддержания среды заданных параметров и с характером развития в древесине внутренних напряжений, когда более резкое падение влажности на поверхности при сушке в паровоздушной среде на втором этапе практически безопасно. На основании экспериментов была установлена следующая зависимость для определения величины t_m на втором этапе сушки (защищено авторским свидетельством на изобретение /12/):

$$t_m = t_{\text{мо}} + (S - 15) \cdot B. \quad (40)$$

Здесь $t_{\text{мо}}$ - температура смоченного термометра для пиломатериалов разных пород толщиной $S = 15\text{ мм}$; B - коэффициент, зависящий от породы, $^{\circ}\text{C}/\text{мм}$. Было получено: сосна (ель, пихта, кедр): $t_{\text{мо}} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $B = 0.33\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мм}$; береза: $t_{\text{мо}} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $B = 0.23\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мм}$. На основании этих данных в самое последнее время разработаны таблицы режимов высоко (и квазивысоко) температурной сушки пиломатериалов, в которых температура среды t_c принимается такой же, как в ныне рекомендуемых режимах /10, 11/. Таблицы новых режимов приводятся ниже.

Таблица 2

Усовершенствованные режимы высокотемпературной сушки пиломатериалов

№ режи- ма	Параметры сушильного агента								
	первая ступень ($W > 20 \%$)			вторая ступень ($W < 20 \%$)					
	$t_c, ^\circ\text{C}$	$\Delta t = (t_c - t_m), ^\circ\text{C}$	ϕ	сосна, ель, пихта, кедр			береза, осина		
				$t_c, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	ϕ	$t_c, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	ϕ
I	130	30	0.35	130	49	0.17	-	-	-
II	120	20	0.50	130	46	0.19	130	49	0.17
III	115	15	0.58	125	38	0.25	125	42	0.21
IV	112	12	0.65	120	-	-	120	34	0.29
V	110	10	0.69	118	27	0.37	118	-	-
VI	108	8	0.75	115	21	0.47	115	26	0.39

Здесь номера режимов (I, II...) выбираются из рекомендуемой Руководящими техническими материалами /10/ таблицы.

Таблица 3

Рекомендуемые номера режимов высокотемпературной сушки пиломатериалов

Породы	Толщина пиломатериалов $S, \text{мм}$				
	до 22	св 22 до 32	св 32 до 40	св 40 до 50	св 50 до 60
сосна, ель, пихта, кедр	I	II	III	V	VI
береза, осина	II	III	IV	VI	-

То, что режимы одного и того же номера дают для березы на второй ступени более низкие значения ϕ , не означает, что режимы для нее более жесткие, чем для сосны. Просто один и тот же номер режима предназначен в этом случае для материалов разных толщин. Например, при толщине $S = 35 \text{ мм}$ для сосны предназначен режим № III ($t_c = 125 ^\circ\text{C}$, $\phi = 0.25$), а для березы – режим № IV ($t_c = 120 ^\circ\text{C}$, $\phi = 0.29$).

Обозначения

Q - количество тепла; τ - время; α - коэффициент теплообмена; t - температура; F - площадь поверхности тела; λ - коэффициент теплопроводности; x - координата в теле, исчисляемая от поверхности; x_k - координата в теле, определяемая поверхностью, на которой происходит кипение; W - влажность материала; ρ_0 - плотность абсолютно сухого тела; r - теплота фазового перехода; $W_{\text{пер}}$ - влажность материала, при которой из него выкипает вся свободная влага; S - толщина тела (пластины); R - половина толщины пластины; c - удельная теплоемкость тела; ρ - плотность тела; Bi - критерий Био; Fo - критерий Фурье; a - коэффициент температуропроводности; t_{c0} - начальная

температура в центре; $t_{цт}$ - температура в центре, не изменяемая во времени; ε - критерий фазового перехода; a' - коэффициент влагопроводности тела; q' - поток влаги в теле; u, u_p - влагосодержание (u) и равновесное влагосодержание (u_p) тела; K_o - критерий Коссовича; $\bar{u}$ - среднее по сечению влагосодержание; $\rho_{кип}$ - масса влаги, выкипевшая из материала; K_i - безразмерные комплексы; n - показатель степени парообразования; Π - безразмерный параметр; m - скорость перемещения границы кипения; B - коэффициент, зависящий от породы при исчислении величины t_m ; t_m - температура смоченного термометра; Δt - психрометрическая разность; 1, 2 - зоны по толщине материала.

Индексы

п - поверхность; 1, 2 относятся к зонам по толщине пластины; с - среда; кип - относится к кипению; н - начальное состояние; к - конечное состояние; ц - центр.

Литература

1. Шубин Г. С. О закономерностях и методах расчета продолжительности высокотемпературной сушки древесины // Всесоюзное совещание по сушке в основных отраслях промышленности и сельского хозяйства. (1956). М.: Профиздат, 1958. 265 с.
2. Михайлов Ю. А. Сушка перегретым паром. М.: Энергия. 199 с.
3. Лыков А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. М.: Госэнергоиздат, 1956. 464 с.
4. Шубин Г. С. Физические основы и расчет процессов сушки древесины. М.: Лесная пром-сть, 1973. 248 с.
5. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.
6. Лейбензон Л. С. О динамическом температурном условии образования складчатости на поверхности земного шара при охлаждении. М.: Изд. АН СССР. ОТН. 1939. № 6. 625 с.
7. Шубин Г. С. Сушка и тепловая обработка древесины. М.: Лесная пром-сть, 1990. 336 с.
8. Вейник А. И. Приближенный расчет процессов теплопроводности. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959. 183 с.
9. Шубин Г. С. Критерий фазового перехода как параметр процесса сушки (на примере древесины) //Тепломассообмен – ММФ-96. III Минский международный форум (май 1996 г.) Тепломассообмен в процессах сушки. Минск: ИТМО им. А. В. Лыкова АН Беларуси, 1996. с. 202 – 205.
10. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки древесины. Архангельск: ЦНИИМОД, 1985. 143 с.
11. Шубин Г. С. Проектирование установок для гидротермической обработки древесины. М.: Лесная пром-сть, 1983. 272 с.
12. Авторское свидетельство 1270610. Способ двухступенчатой конвективной сушки пиломатериалов. Б. И. 1986. № 42.