

УДК 674.047

ШУБИН Г.С.*Московский государственный университет леса, Россия*

РЕЖИМЫ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ И ИХ РАЦИОНАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Щоб виключити розтріскування деревини через внутрішні напруження у процесі сушіння, доцільно переходити від одного ступеня сушіння до другого при певній перехідній вологості у визначених зонах штабелю.

Розв'язано оптимізаційну задачу, що дає змогу визначити при яких значеннях перехідної вологості та швидкостях повітря та нереверсивній циркуляції забезпечується мінімальна тривалість процесу із збереженням цілісності матеріалу.

Для исключения растрескивания древесины из-за возникающих в процессе сушки внутренних напряжений целесообразно осуществлять переход от одной ступени сушки к другой при определенной переходной влажности в определенных зонах штабеля.

Решена оптимизационная задача, позволяющая определить при каких значениях переходной влажности и скоростях воздуха при нереверсивной циркуляции обеспечивается минимальная продолжительность процесса при сохранении целостности материала.

It is shown that for prevention of wood checking because of excessive drying stresses transition from a step on a step is expedient for carrying out at the certain transitive moisture content in specific zones of a stack.

The optimization problem allowing to define at what values of transitive moisture content and air velocity at not reversible circulation the minimal duration of drying is provided at preservation of integrity of a material is solved.

C – удельная теплоемкость;

E – модуль упругости;

$P_{\text{п}}$ – давление пара;

$R_{\text{пр}}$ – половина толщины зазора между пластинами по высоте пакета (половина толщины прокладки для штабеля);

$R_{\text{п}}$ – газовая постоянная пара;

S – толщина пластины;

T, t – температура;

u – влагосодержание;

W – влажность;

\bar{W} – среднее по сечению пластины значение влажности;

$W_{\text{р}}$ – равновесная влажность;

z – координата в направлении движения воздуха;

$Z_{\text{к}}$ – целевая функция;

α – коэффициент теплообмена;

α' – коэффициент влагообмена;

$\alpha_{\text{у}}$ – коэффициент усушки;

ρ – плотность;

σ – внутренние напряжения;

τ – время;

φ – степень насыщенности среды;

ω – скорость циркуляции воздуха.

Индексы:

k – конечное значение;

0 – сухое тело, начальное состояние;

п – пар, поверхность;

пер – переходная;

пн – пар насыщенный;

s – среда;

ф – фактическое значение;

ц – центр;

1, 2, 3, 4, 5 – номера зон в пакете (штабеле);

$i = 1, 2, 3, \dots m$ – порядковый номер;

$j = 1, 2, 3, \dots n$ – порядковый номер.

Сушка древесины – процедура весьма длительная, трудоемкая и сложная, во время сушки древесины в ней возникают внутренние напряжения, которые часто приводят к растрескиванию пиломатериалов. Чтобы исключить это, необходимо сушить древесину по

отработанным режимам сушки и правильно их осуществлять. Одному из вопросов данной проблемы – установлению места в штабеле (по его ширине), по влажности в котором целесообразен переход режима сушки от одной ступени сушки к другой, посвящена эта статья.

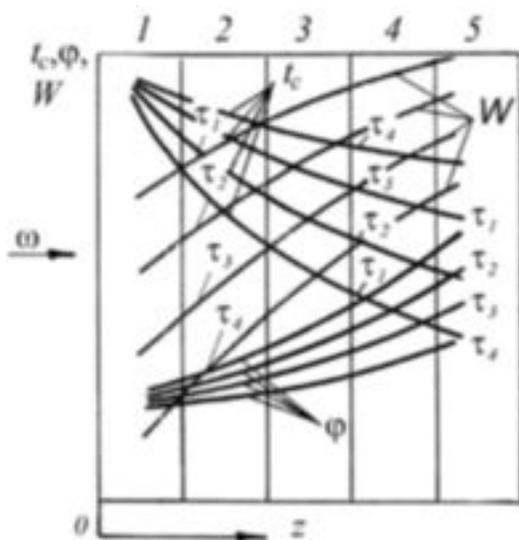


Рис. 1. Схема изменения t_c , ϕ и W по объему штабеля и во времени τ .

Вопрос этот до настоящего времени научно не обоснован. Постановка задачи имеется лишь в нашей работе [1].

В процессе сушки состояние среды и влажность древесины неодинаковы по объему штабеля и изменяются во времени τ . По ходу движения воздуха температура среды t_c падает, а степень ее насыщенности ϕ и влажность древесины W возрастают. С течением времени t_c в каждой зоне штабеля увеличивается, а ϕ и W — уменьшаются. Схематически такой характер изменения параметров среды и материала изображен на рис. 1, где индексы 1, 2, 3, 4 при τ характеризуют время в моменты 1, 2, 3, 4 (штабель условно разбит на 5 зон по ходу движения воздуха — в направлении z).

Режим сушки в камерах периодического действия включает несколько ступеней (при основном низкотемпературном процессе сушки: по мягкому, нормальному и форсированному режиму — 3 ступени [2, 3]), на которых t_c и ϕ у входа воздуха в штабель принимаются постоянными и переход от одной ступени к другой осуществляется при определенной, так называемой переходной влажности пиломатериалов $W_{\text{пер}}$. Величина последней устанавливалась при разработке режимов сушки и связывалась с величиной возникающих в древесине внутренних напряжений σ , которые как раз и зависят от состояния среды (t_c и ϕ) и материала (в основном — W).

Это означает, что на каждой ступени режима рекомендуемые величины t_c и ϕ обеспечивают требуемую безопасность древесины при данной переходной влажности и, наоборот, более жесткие условия среды опасны и могут вызывать чрезмерные внутренние напряжения и растрескивание материала. В связи с этим возникает ряд проблем и, в частности, проблема установления места в штабеле, по влажности пиломатериалов в котором следует осуществлять переход от одной ступени режима к другой.

В руководящих материалах по камерной сушке (РМ и РТМ) [2,3] не указывается, в каком месте штабеля должна быть достигнута $W_{\text{пер}}$ для перехода к следующей ступени режима сушки. Вместе с тем совершенно очевидно, что этот вопрос прямо связан и с безопасностью материала, и с длительностью процесса. Если переходить от ступени к ступени режима по влажности в наиболее медленно сохнувшей зоне (наиболее удаленная от входа воздуха, при нереверсивной циркуляции — зона 5, рис.1), то безопасность материала будет обеспечена, но длительность процесса сушки будет наибольшей. Если же переходить от ступени к ступени по зоне с минимальной влажностью древесины W (1-ая зона), то для других зон, имеющих более высокие значения W , состояние среды в них, будучи более мягким, может, тем не менее, оказаться более жестким, чем рекомендуется режимами сушки для данной влажности древесины, и, следовательно, недопустимым, хотя сроки сушки в этом случае будут минимальными. Вместе с тем, это может быть и не так вследствие того, что хотя влажность древесины по ходу движения воздуха увеличивается, но и режим сушки смягчается, и он может оказаться приемлемым. Конкретный ответ на поставленные вопросы может дать только анализ реального состояния среды и материала по объему штабеля и во времени. Решение задачи оказывается, таким образом, неоднозначным, она может быть сформулирована как оптимизационная:

$$\text{Целевая функция: } Z_k = \tau \rightarrow \min . \quad (1)$$

$$\text{Ограничения: } t_{c\phi} \leq t_{c\text{w}} , \quad (2)$$

$$\phi_{\phi} \geq \phi_w . \quad (3)$$

Для решения оптимизационной задачи была использована известная система уравнений тепломассопереноса А.В. Лыкова, которую мы здесь опускаем, дополненная полученными нами [1] балансовыми дифференциальными уравнениями изменения состояния среды по ходу движения агента сушки. Эта дополнения имеют вид:

$$\frac{\partial t_c(\tau)}{\partial Z} = \frac{\alpha [t_n(\tau) - t_c(\tau)]}{R_{np} \omega \rho_c C_c}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi(\tau)}{\partial Z} = & \frac{\alpha' \rho_0 [u_n(\tau) - u_p(\tau)]}{R_{np} \omega \rho_{пн}} - \varphi \times \\ & \times \left[\frac{(t_c + 273) \frac{\partial P_{пн}(t_c)}{\partial Z} - P_{пн}(t_c) \frac{\partial (t_c + 273)}{\partial Z}}{(t_c + 273)} \right] \times \\ & \times \frac{1}{P_{пн}(t_c)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Дополнительно ввели также уравнения изменения внутренних напряжений в пиломатериалах при сушке:

$$\sigma_j^{n+1} = \sigma_j^n + \Delta \sigma_j, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_j = & \left\{ \frac{\sum_{i=1}^m [\alpha_y(u_i) \Delta u_i - \alpha_y(u_j) \Delta u_j]}{\sum_{i=1}^m E(u_i, t_i)} \times \right. \\ & \left. \times \frac{E(u_i, t_i)}{\sum_{i=1}^m E(u_i, t_i)} \right\} E(u_j, t_j). \end{aligned} \quad (7)$$

Уравнение (7) соответствует принятому Б.Н. Уголевым с соавторами в работе [4] с той лишь разницей, что коэффициент усушки α_y внесен в уравнении (7) под знак суммы, так как он может приниматься постоянным при $u < u_{пн}$ и равным 0 при $u > u_{пн}$.

Для численного решения нелинейной системы уравнений использовалась составленная по ней программа расчетов на ЭВМ.

Оптимизационная задача решалась методом перебора вариантов. Расчеты велись по рекомендуемым [2, 3] 3-х ступенчатым режимам сушки с фиксацией значений изменяющихся по ходу движения воздуха в штабеле температуры среды, степени ее насыщенности, равновесной влажности, а также влажности, температуры, внутренних напряжений и пределов прочности древесины на поверхности и в центре пластины.

Наибольший интерес представляет анализ вопроса для случаев интенсивной сушки, когда изменение параметров среды по объему штабеля наиболее существенно. В связи с этим рассчитывалась: а) сушка тонких сосновых пиломатериалов при нормальных режимах, $S = 22$ мм, переходных влажностях $W_{пер} = 30\%$ и 20% (рекомендации РМ [2]) и скорости циркуляции $\omega = 1$ м/с, а также, б) сушка при $S = 25$ мм, $W_{пер} = 35\%$, 25% (рекомендации РТМ [3]), и скорости циркуляции $\omega = 1, 2$ и 4 м/с.

Расчеты велись при переходе от ступени к ступени режима сушки последовательно по переходной влажности $W_{пер}$ в 1-ой, 3-ей и 5-ой зонах штабеля (первый номер присвоен зоне, ближайшей к входу воздуха в штабель). Во втором случае ($S = 25$ мм) имелось в виду проанализировать влияние скорости воздуха на процесс сушки. Выбор рациональной зоны штабеля по влажности, в которой целесообразно производить переход от ступени к ступени режима сушки, зависит от характера циркуляции и наиболее важен при нереверсивной циркуляции, которая далее и рассматривается. Пример графиков процесса приведен на рис. 2. (режим Н, $W_{пер} = 30\%$ и 20%)

В табл. 1, 2 и 3 приведены полученные расчетом на ЭВМ для условий сушки нормальным режимом при $S = 22$ мм, $W_{пер} = 30\%$ и 20% и $\omega = 1$ м/с фактические влажность пиломатериалов $W_{ф}$ и состояние среды ($t_{сф}$ и $\varphi_{ф}$) в каждой из зон штабеля при переходе от 1-ой ступени ко 2-ой и к 3-ей ступени режима сушки по переходной влажности $W_{пер}$ в 5-ой, 3-ей и 1-ой зонах штабеля. Здесь же в табл. 1 – 3 приведены значения ($t_{св}$ и $\varphi_{в}$), которые рекомендуются в соответствии с режимами для данной влажности пиломатериалов [2].

Табл. 1. Переход от ступени к ступени по влажности $W_{\text{пер}}$ в 5-ой зоне

| №№ зоны | Переход ко 2-ой ступени | | | | | Переход к 3-ей ступени | | | | |
|------------|-------------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| | $W_{\text{ф}},$ % | $t_{\text{сф}},$ °C | $\varphi_{\text{ф}}$ | $t_{\text{св}},$ °C | $\varphi_{\text{в}}$ | $W_{\text{ф}},$ % | $t_{\text{сф}},$ °C | $\varphi_{\text{ф}}$ | $t_{\text{св}},$ °C | $\varphi_{\text{в}}$ |
| 1 | 13 | 84 | 0,59 | 108 | 0,24 | 10 | 100 | 0,26 | 108 | 0,24 |
| 2 | 15 | 83 | 0,61 | 108 | 0,24 | 11 | 98 | 0,27 | 108 | 0,24 |
| 3 | 16 | 82 | 0,64 | 108 | 0,24 | 12 | 95 | 0,30 | 108 | 0,24 |
| 4 | 21 | 81 | 0,65 | 87 | 0,55 | 16 | 92 | 0,31 | 108 | 0,24 |
| 5 | 30 | 80 | 0,70 | 87 | 0,55 | 20 | 90 | 0,35 | 108 | 0,24 |

Табл. 2. Переход от ступени к ступени по влажности $W_{\text{пер}}$ в 3-ой зоне

| №№ зоны | Переход ко 2-ой ступени | | | | | Переход к 3-ей ступени | | | | |
|------------|-------------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| | $W_{\text{ф}},$ % | $t_{\text{сф}},$ °C | $\varphi_{\text{ф}}$ | $t_{\text{св}},$ °C | $\varphi_{\text{в}}$ | $W_{\text{ф}},$ % | $t_{\text{сф}},$ °C | $\varphi_{\text{ф}}$ | $t_{\text{св}},$ °C | $\varphi_{\text{в}}$ |
| 1 | 20 | 83 | 0,59 | 108 | 0,24 | 15 | 100 | 0,26 | 108 | 0,24 |
| 2 | 24 | 82 | 0,62 | 87 | 0,55 | 17 | 99 | 0,27 | 108 | 0,24 |
| 3 | 29 | 80 | 0,67 | 87 | 0,55 | 19 | 95 | 0,30 | 87 | 0,24 |
| 4 | 41 | 77 | 0,73 | 82 | 0,65 | 26 | 92 | 0,33 | 87 | 0,55 |
| 5 | 56 | | | 82 | 0,65 | 37 | 90 | 0,38 | 82 | 0,65 |

Табл. 3. Переход от ступени к ступени по влажности $W_{\text{пер}}$ в 1-ой зоне

| №№ зоны | Переход ко 2-ой ступени | | | | | Переход к 3-ей ступени | | | | |
|------------|-------------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| | $W_{\text{ф}},$ % | $t_{\text{сф}},$ °C | $\varphi_{\text{ф}}$ | $t_{\text{св}},$ °C | $\varphi_{\text{в}}$ | $W_{\text{ф}},$ % | $t_{\text{сф}},$ °C | $\varphi_{\text{ф}}$ | $t_{\text{св}},$ °C | $\varphi_{\text{в}}$ |
| 1 | 30 | 102 | 0,59 | 87 | 0,55 | 20 | 108 | 0,26 | 108 | 0,24 |
| 2 | 34 | 81 | 0,65 | 82 | 0,65 | 25 | 96 | 0,30 | 87 | 0,55 |
| 3 | 42 | 76 | 0,72 | 82 | 0,65 | 30 | 90 | 0,32 | 87 | 0,55 |
| 4 | 56 | 75 | 0,80 | 82 | 0,65 | 40 | 89 | 0,35 | 82 | 0,65 |
| 5 | 68 | 72 | 0,92 | 82 | 0,65 | 53 | 82 | 0,44 | 82 | 0,65 |

Из анализа табл. 1 следует, что, как и можно было ожидать, при переходе от ступени к ступени по влажности самой медленно сохнущей зоны фактическое состояние среды по всему объему штабеля оказывается приемлемым (во всех зонах штабеля $t_{\text{сф}} < t_{\text{св}}$ и $\varphi_{\text{ф}} > \varphi_{\text{в}}$).

При переходе по влажности в 3-ей зоне (табл. 2) и в 1-ой зоне (табл. 3) ко 2-ой ступени режима сушки состояние среды в каждой зоне штабеля оказывается допустимым ($t_{\text{сф}} < t_{\text{св}}$ и $\varphi_{\text{ф}} > \varphi_{\text{в}}$). При переходе же к 3-ей ступени режима сушки по влажности как в 3-ей, так и в 1-ой зонах штабеля состояние среды получается более жестким, чем это рекомендуется режимом сушки ($t_{\text{сф}} > t_{\text{св}}$ и $\varphi_{\text{ф}} < \varphi_{\text{в}}$), и, следовательно, опасным для безопасности ма-

териала: в первом случае в зонах 4 и 5 и во втором – в зонах 2, 3, 4, 5. При этом переход по влажности в 3-ей зоне создает недопустимое состояние среды лишь в 4-ой и 5-ой зонах, а переход по влажности в 1-ой зоне – во всех зонах штабеля, кроме первой.

Проанализируем продолжительность сушки во всех приведенных случаях (табл. 4), нормальный режим сушки, $S = 22$ мм, $W_{\text{пер}} - 30\%$ и 20% и $\omega = 1$ м/с.

Из табл. 4 видим, что переход ко 2-ой и 3-ей ступени режима сушки (по влажности в 3-ей зоне) сокращает продолжительность процесса по сравнению с переходом по влажности в 5-ой зоне от 22% (в 4-ой зоне) до 38% (в 1-ой зоне). При пе-

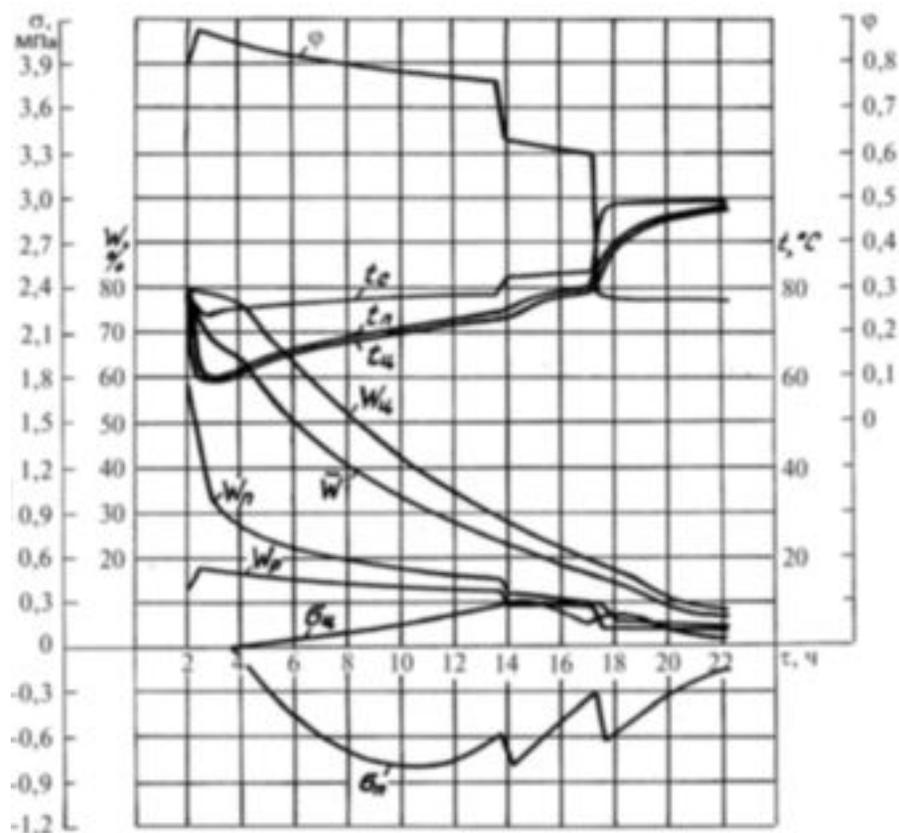


Рис. 2. Пример графиков процесса сушки при нереверсивной циркуляции во 2-ой зоне штабеля. Переход от ступени к ступени режима сушки по влажности в 3-ей зоне. Сосна, $S = 22$ мм.

переходе по влажности в 1-ой зоне, это сокращение еще больше: 64% – в 1-ой зоне и 53% – во 2-ой зоне.

Результаты расчета на ЭВМ показывают, что W древесины, равное $W = 20\%$, достигается при переходе к 3-ей ступени режима сушки по влажности в 1-ой зоне через 12,5 часов. В 5-ой зоне в это время влажность составляет 70%, а $W = 20\%$ достигается при $\tau = 18,5$ часов.

Табл. 4. Продолжительность сушки (τ , ч) до $W_k = 10\%$

| №зона | Переход от ступени к ступени по влажности | | |
|-------|---|--------------|-------------|
| | в 1-ой зоне | в 3-ей зоне | в 5-ой зоне |
| 1 | 15,5 | 18,5 | 25,5 |
| 2 | 17,0 | 19,5 | 26,0 |
| 3 | $W_k > 10\%$ | 20,5 | 26,5 |
| 4 | – “ – | 22,5 | 27,5 |
| 5 | – “ – | $W_k > 10\%$ | 29,0 |

Следовательно, в 5-ой зоне процесс отстает от 1-ой зоны на 6 часов (18,5...12,5). Если внести этот корректив в расчеты, то, как следует из табл. 4, общая продолжительность процесса (до $W_k = 10\%$) при переходе ко 2-ой ступени по влажности в 1-ой зоне, а к 3-ей ступени по влажности в 5-ой зоне приблизительно составит: в 1-ой зоне $15,5 + 6 = 21,5$ ч, во 2-ой зоне $17,0 + 6 = 23$ часа. По сравнению с переходом ко 2-ой и 3-ей ступеням режима по влажности в 5-ой зоне экономия во времени составит 18,6% в 1-ой зоне и 13% – во 2-ой зоне.

Важные результаты были получены при исследовании влияния скорости циркуляции щ на определение зоны в штабеле, по влажности в которой следует переходить от ступени к ступени режима сушки. Как отмечалось выше, расчеты на ЭВМ при разных ω велись для сушки сосновых пиломатериалов толщиной 25 мм по нормальному режиму при скоростях циркуляции $\omega = 1,0; 2,0; 4,0$ м/с и переходных влажностях $W_{пер} = 35$ и 25% (рекомендации РТМ [3]). Переход ко 2-ой

Табл. 5. Переход от ступени к ступени режима сушки по влажности $W_{\text{пер}}$ в 3-ой зонеа. Скорость циркуляции $\omega = 1,0$ м/с

| №№ зоны | Переход ко 2-ой ступени | | | | | Переход к 3-ей ступени | | | | |
|------------|-------------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|------------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|
| | $W_{\text{ф}},$ % | $t_{\text{сф}},$ °C | $\Phi_{\text{ф}}$ | $t_{\text{св}},$ °C | $\Phi_{\text{в}}$ | $W_{\text{ф}},$ % | $t_{\text{сф}},$ °C | $\Phi_{\text{ф}}$ | $t_{\text{св}},$ °C | $\Phi_{\text{в}}$ |
| 1 | 32 | 84 | 0,59 | 84 | 0,59 | 20 | 105 | 0,26 | 105 | 0,26 |
| 2 | 33,5 | 82 | 0,59 | 84 | 0,59 | 22 | 103 | 0,27 | 105 | 0,26 |
| 3 | 35 | 80 | 0,62 | 84 | 0,59 | 24 | 102 | 0,28 | 105 | 0,26 |
| 4 | 37 | 79 | 0,63 | 79 | 0,73 | 25 | 100 | 0,29 | 84 | 0,59 |
| 5 | 38,5 | 72 | 0,75 | 79 | 0,73 | 26 | 95 | 0,30 | 84 | 0,59 |

б. Скорость циркуляции $\omega = 2,0$ м/с

| №№ зоны | Переход ко 2-ой ступени | | | | | Переход к 3-ей ступени | | | | |
|------------|-------------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|------------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|
| | $W_{\text{ф}},$ % | $t_{\text{сф}},$ °C | $\Phi_{\text{ф}}$ | $t_{\text{св}},$ °C | $\Phi_{\text{в}}$ | $W_{\text{ф}},$ % | $t_{\text{сф}},$ °C | $\Phi_{\text{ф}}$ | $t_{\text{св}},$ °C | $\Phi_{\text{в}}$ |
| 1 | 33,5 | 84 | 0,59 | 84 | 0,59 | 24,5 | 105 | 0,26 | 105 | 0,26 |
| 2 | 34,5 | 83 | 0,60 | 84 | 0,59 | 25,5 | 103 | 0,27 | 84 | 0,59 |
| 3 | 35,0 | 82 | 0,62 | 84 | 0,59 | 26,5 | 103 | 0,28 | 84 | 0,59 |
| 4 | 36,5 | 81 | 0,63 | 79 | 0,73 | 27,5 | 101 | 0,29 | 84 | 0,59 |
| 5 | 37,5 | 80 | 0,65 | 79 | 0,73 | 28,5 | 100 | 0,30 | 84 | 0,59 |

в. Скорость циркуляции $\omega = 4,0$ м/с

| №№ зоны | Переход ко 2-ой ступени | | | | | Переход к 3-ей ступени | | | | |
|------------|-------------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|------------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|
| | $W_{\text{ф}},$ % | $t_{\text{сф}},$ °C | $\Phi_{\text{ф}}$ | $t_{\text{св}},$ °C | $\Phi_{\text{в}}$ | $W_{\text{ф}},$ % | $t_{\text{сф}},$ °C | $\Phi_{\text{ф}}$ | $t_{\text{св}},$ °C | $\Phi_{\text{в}}$ |
| 1 | 36,5 | 84 | 0,59 | 79 | 0,73 | 26,5 | 105 | 0,26 | 84 | 0,59 |
| 2 | 37,5 | 83 | 0,60 | 79 | 0,73 | 27,5 | 104 | 0,27 | 84 | 0,59 |
| 3 | 37,5 | 83 | 0,61 | 79 | 0,73 | 27,5 | 103 | 0,28 | 84 | 0,59 |
| 4 | 38,0 | 82 | 0,63 | 79 | 0,73 | 28,0 | 102 | 0,29 | 84 | 0,59 |
| 5 | 38,5 | 81 | 0,64 | 79 | 0,73 | 28,5 | 100 | 0,30 | 84 | 0,59 |

и 3-ей ступеням режима в расчетах производился при всех скоростях циркуляции по влажности пиломатериалов в средней (3-ей) зоне.

Итоговые данные по фактической влажности пиломатериалов и состоянию среды в каждой зоне штабеля при нормальном режиме и $S = 25$ мм [3] приведены в табл. 5 (а, б, в.). В них же содержатся температура среды ($t_{\text{св}}$) и степень ее насыщенности ($\Phi_{\text{в}}$), соответствующие по режимным рекомендациям [3] фактической влажности в зоне штабеля.

Анализ табл. 5 показывает, что увеличение скорости циркуляции делает более оправданным переход от ступени к ступени режима по влажно-

сти более медленно сохнувшей зоны. Как и в случае рассмотренной выше сушки пиломатериалов толщиной 22 мм, переходных влажностях 30 и 20% (рекомендации [2]) и скорости циркуляции 1,0 м/с, так и в данном случае (толщина 25 мм, переходные влажности 35 и 25%, та же скорость циркуляции) переход ко 2-ой ступени возможен по влажности в 3-ей зоне, а переход к 3-ей ступени режима по влажности в 3-ей зоне оказывается опасным для пиломатериалов, находящихся в зонах 4 и 5. Здесь фактические температуры ($t_{\text{сф}} = 100$ и 95 °C) оказываются существенно выше регламентируемых по данной влажности ($t_{\text{св}} = 84$ °C) и, что осо-

Табл. 6. Продолжительность сушки ($W_k = 10\%$) при различных скоростях циркуляции

| №№ зоны | Продолжительность сушки (τ , ч) при скоростях циркуляции | | |
|---------|--|----------------------|----------------------|
| | $\omega = 1,0$ м/с | $\omega = 2,0$, м/с | $\omega = 4,0$, м/с |
| 1 | 24,8 | 21,8 | 20,0 |
| 2 | 25,3 | 22,3 | 20,4 |
| 3 | 26,0 | 22,6 | 20,6 |
| 4 | 27,0 | 23,0 | 20,8 |
| 5 | 27,6 | 23,3 | 21,0 |

бенно опасно, здесь фактические степени насыщенности среды существенно ниже ($\varphi_{\text{ф}} = 0,29$ и $0,3$), чем допускается нормативными режимами ($\varphi_{\text{н}} = 0,59$). При скорости циркуляции $\omega = 2,0$ м/с (табл. 5, б) переход по влажности в 3-ей зоне даже ко 2-ой ступени оказывается в некоторой мере опасным для 4-ой и 5-ой зон. Однако здесь различие в фактических и допустимых значениях t и φ не столь существенны, как в приведенном выше случае ($\omega = 1,0$ м/с). Переход к 3-ей ступени по влажности в 3-ей зоне существенно опасен для всех (кроме 1-ой) зон штабеля. При скорости циркуляции $\omega = 4,0$ м/с (табл. 5, в) переход и ко 2-ой и тем более к 3-ей ступени режима сушки по влажности в средней (3-ей) зоне недопустим.

Приведем данные по длительности процесса (например, до $W_k = 10\%$) в каждой зоне штабеля (табл. 6) при различной скорости циркуляции. $S = 25$ мм, $W_{\text{пер}} = 30$ и 20% и $\omega = 1$ м/с.

Из табл. видим, что при $\omega = 2,0$ м/с продолжительность сушки по сравнению с сушкой при $\omega = 1,0$ м/с сокращается в среднем на 13...18%, а при $\omega = 4,0$ м/с на 24...30%. При этом неравномерность сушки по объему штабеля естественно возрастает с уменьшением скорости циркуляции: разница в достижении влажности $W_k = 10\%$ между 1-ой и 5-ой зонами составляет: при скорости цир-

куляции $\omega = 1,0$ м/с – 2,8 ч, при $\omega = 2,0$ м/с – 1,5 ч, при $\omega = 4,0$ м/с – 1,0 ч.

В заключение можно сделать следующие обобщенные выводы:

Выводы

Результаты расчетов показывают, что для сохранения целостности материала при минимальной продолжительности сушки и неререверсивной циркуляции целесообразен переход от 1-ой ступени режима сушки ко 2-ой ступени по переходной влажности в 1-ой зоне (при условном разбиении штабеля на 5 зон по ходу движения воздуха), а от 2-ой ступени к 3-ей – по переходной влажности в самой медленно сохнущей (5-ой) зоне. Это относится к скоростям циркуляции до 2 м/с. При скорости циркуляции, превышающей 2 м/с, безопасное ведение процесса сушки на всем его протяжении должно осуществляться только по переходной влажности в самой медленно сохнущей зоне. В дальнейшем целесообразно рассмотреть этот вопрос для других пород и толщин.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Руководящие материалы (РМ) по камерной сушке пиломатериалов.* – Архангельск: ЦНИИМОД, 1982. – 94 с.
2. *Руководящие технические материалы (РТМ) по технологии камерной сушки древесины.* – Архангельск: ЦНИИМОД, 1985. – 144 с.
3. *Шубин Г.С.* Сушка и тепловая обработка древесины. – М.: Лесная промышленность, 1990. – 336 с.
4. *Уголев Б.Н., Лапшин Ю.Г., Кротов Е.В.* Контроль напряжений при сушке древесины. – М.: Лесная промышленность, 1980. – 205 с.

Получено 19.06.2006 г.