

- разработанный режим сушки позволяет уменьшить затраты тепловой энергии на испарение влаги из древесины по сравнению со стандартным режимом [1].

## Библиографический список

1. ГОСТ 18867 – 84. Пиломатериалы хвойных пород. Режимы сушки в противоточных камерах непрерывного действия [Текст]. – Взамен ГОСТ 18867-73 ; введ. 1985–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 2005. – 6 с.
2. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки пиломатериалов [Текст] / Архангельск: ОАО «Научдревпром - ЦНИИМОД», 2000. – 125 с.
3. Степанов В. И. Проектирование сушильных камер непрерывного действия [Текст] : учеб. пособие для студентов специальности 26.02.00 всех форм обучения/ В. И. Степанов, Т.В. Ермолина, П. Е. Зубань, В. Ф. Ушанов. – Красноярск: СибГТУ, 2001. – 122 с. – ISBN 5-8173-0028-1.

**Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Гороховский А.А.**

(УГЛТУ, г. Екатеринбург, РФ) [elenashishkina@yandex.ru](mailto:elenashishkina@yandex.ru)

## **ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ВЕЛИЧИНЫ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ *IMPROVING CONVECTIVE TIMBER DRYING***

Анализируя мнение основоположников отечественной науки о сушке древесины Н.С. Селюгина [1], П.С. Серговского [2] и И.В. Кречетова [3] можно выделить следующие основные факторы, определяющие качество сушки пиломатериалов:

- требования к качеству сушки
- контроль качества
- свойства древесины, как материала, подвергаемого сушке
- технология сушки

РТМ [4] нормируют требования к качеству сушки, устанавливая при этом:

- категории качества сушки
- перечень показателей качества сушки, к которым относятся:

а) Соответствие средней влажности высушенных пиломатериалов в штабеле заданной конечной влажности;

б) Величина отклонений влажности отдельных досок или заготовок от средней влажности пиломатериалов в штабеле;

в) Перепад влажности по толщине пиломатериалов (заготовок);

г) Остаточные напряжения в высушенных пиломатериалах (заготовках).

- Значение показателей и условия их определения.

Показатели качества сушки пиломатериалов (заготовок) подлежат нормированию. Нормы устанавливаются в зависимости от категории качества сушки и условий эксплуатации изделий [4].

Вопросы, касающиеся влияния режимов сушки на качество сушки пиломатериалов, весьма подробно исследованы в 50-е – 80-е годы [2, 5 – 9 и др].

П.С. Серговский, один из основоположников отечественной науки о сушке древесины, в [2, 5, 6] отмечает, что от режима сушки зависят не все качественные показатели, а только два из них: целостность материала, обусловленная величиной полных внутренних напряжений в древесине, и степень сохранения прочности древесины, обусловленная уровнем и длительностью температурных воздействий на нее.

Построение режимов сушки должно производиться таким образом, что по ходу всего процесса максимальные значения внутренних напряжений в древесине не превысили максимально допустимой величины. Режим характеризуется коэффициентом безопасности:

$$B = \frac{\sigma_{пр.р.}}{\sigma_{макс}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{пр.р.}$  – расчетный предел прочности древесины;

$\sigma_{макс}$  – максимальная величина внутренних напряжений.

Оптимальным является (по мнению авторов) такая величина параметров сушильного агента ( $t$  и  $\phi$ ), при которой  $B = 1$ . Если  $B < 1$ , то режим не обеспечивает сохранения целостности материала, если  $B > 1$ , не достигается максимально возможная интенсивность процесса. При этом сам П.С. Серговский не дает ответа на вопрос о возможных (допустимых) отклонениях величины  $B$  при разработке и практическом изменении конкретного режима, а Л.П. Красухина [8] дает величину  $\pm 0,02$ , т.е.  $\pm 2\%$ . Однако РТМ [10] для предела прочности древесины дает значение коэффициента вариации  $10\%$ . При этом качество сушки может быть полностью гарантировано при  $B = 1,3$  (с вероятностью  $p = 99, 87\%$ ) [11]. Соответственно, при  $B = 1,2$  гарантировано с вероятностью  $p = 95\%$ , а при  $B = 1,1$ ,  $p = 90\%$ .

Совокупность параметров режима однозначно определяет величину показателей эффективности и качества высушиваемой древесины [11]. Следовательно, задача о повышении значений данных показателей может рассматриваться как оптимизационная (рис. 1).

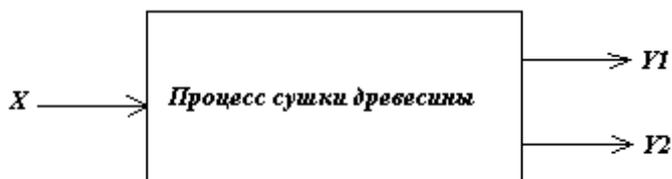


Рисунок 1 – Постановка задачи оптимизации процесса сушки древесины

$X$  – вектор управляющих факторов;

$Y1$  – вектор параметров эффективности;

$Y2$  – вектор параметров качества.

Для математического описания процесса низкотемпературной конвективной сушки неограниченной пластины (пиломатериала) А.В. Лыков [12, 13], М.С. Смирнов [14] и Г.С. Шубин [15] предлагают следующую систему дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП).

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{\varepsilon \cdot \rho}{c} \frac{\partial u}{\partial \tau}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 u + a_m \delta \nabla^2 t, \quad (3)$$

Для неограниченной пластины начальные и граничные условия III рода имеют вид:

$$t(x_0, 0) = f(x), \quad (4)$$

$$u(x, 0) = \varphi(x), \quad (5)$$

$$-\lambda \frac{\partial t(R, \tau)}{\partial x} + \alpha [t_c - t(R, \tau)] - (1 - \varepsilon) \rho_0 \alpha_m [u(R, \tau) - u_p] = 0 \quad (6)$$

$$a_m \frac{\partial u(R, \tau)}{\partial x} + a_m \delta \frac{\partial t(R, \tau)}{\partial x} + \alpha_m [u(R, \tau) - u_p] = 0 \quad (7)$$

Условие симметрии:

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial u(0, \tau)}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

где  $t$  – температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$u$  – влажность;

$\tau$  – время, с;

$a$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$a_m$  – коэффициент влагопроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$\varepsilon$  – коэффициент фазового превращения;

$\rho$  – плотность древесины,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$c$  – теплоемкость древесины,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{град})$ ;

$\delta$  – термоградиентный коэффициент;

$x$  – координата в направлении толщины пластины, м;

$R$  – половина толщины пластины, м;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$ ;

$\alpha$  – коэффициент теплообмена,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{град})$ ;

$\alpha_m$  – коэффициент влагообмена,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$\rho_0$  – базисная плотность древесины,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$t_c$  – температура среды,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$u_p$  – равновесная влажность древесины.

Для решения системы (2) – (8) разработано программное обеспечение (ПО) в вычислительной среде Mathcad – 14 [16] на основе неявного метода [17, 18, 19]. Кроме того, использовалось ПО для расчета внутренних напряжений [11] на основе многостержневой модели доски [20]. Используя вышеупомянутое ПО был реализован вычислительный эксперимент. Постоянными факторами при проведении эксперимента были следующие:

1. Вид пиломатериала – условный (сосна, сечение 40x150 мм);

2. Тип режима – бесступенчатый [11]

- температура обрабатываемой среды

$$t_c = t_n + (t_k - t_n) \frac{(u_n - u)}{(u_n - 0,1)}; \quad (9)$$

- равновесная влажность

$$u_p = u_{pk} + (u_{pn} - u_{pk}) e^{-e^{-(b_0 + b_1 u)}}, \quad (10)$$

где  $t_n$ ,  $t_k$  – соответственно, начальная и конечная температура агента сушки,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$u_n$ ,  $u$  – соответственно, начальная и текущая влажность древесины;

$u_{pn}$ ,  $u_{pk}$  – соответственно, начальное и конечное значение равновесной влажности;

$b_0, b_1$  – коэффициенты.

Выражение (10) представляет собой функцию желательности [21], которая характеризуется двумя переходными значениями  $u$ , обозначенными соответственно  $u_{п1}$  и  $u_{п2}$ . Причем  $u_{п2} = 0,35$  и  $u_{п1} = 0,6$  – оставались постоянными во всех опытах. Теплофизические характеристики древесины и среды определялись по известным выражениям Г.С. Шубина [15]. Переменные факторы при проведении эксперимента:  $u_{рн}$  ( $x_1$ ),  $u_{рк}$  ( $x_2$ ),  $u_{п1}$  ( $x_3$ ),  $t_{н}$  ( $x_4$ ),  $t_{к}$  ( $x_5$ ).

Факторы варьировались на трех уровнях, их значения в кодированном и натуральном выражении представлены в табл. 1.

Выходные параметры:

$\tau_1$  ( $y_1$ ) – продолжительность сушки пиломатериалов до влажности  $W = 12\%$ ;

$\tau_2$  ( $y_2$ ) – продолжительность сушки пиломатериалов до влажности  $W = 7\%$ ;

$S_{т}$  ( $y_3$ ) – перепад влажности по толщине доски [4];

$S_w$  ( $y_4$ ) – среднее квадратическое отклонение влажности [22, 23];

$B_{min}$  ( $y_5$ ) – минимальное значение критерия безопасности режима в процессе каждой сушки.

Таблица 1 – Переменные факторы при проведении вычислительного эксперимента

№ п/п	Факторы	Значение фактора на уровнях					
		Нижний		Основной		Верхний	
		Кодир.	Натур.	Кодир.	Натур.	Кодир.	Натур.
1	$u_{рн}$ ( $x_1$ )	-	0,1	0	0,14	+	0,18
2	$u_{рк}$ ( $x_2$ )	-	0,02	0	0,03	+	0,04
3	$u_{п1}$ ( $x_3$ )	-	0,1	0	0,15	+	0,2
4	$t_{н}$ ( $x_4$ )	-	60	0	70	+	80
5	$t_{к}$ ( $x_5$ )	-	80	0	90	+	100

В процессе эксперимента был реализован план Хартли [24], состоящий из 27 опытов. В результате были получены зависимости каждого выходного параметра от входных в виде полиномов второго порядка.

Затем проводилась оптимизация по каждому из выходных параметров ( $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $S_{т}$ ,  $S_w$ ,  $B_{min}$ ).

Постановка задач оптимизации была следующая:

$$\left. \begin{aligned} y_1 &\rightarrow \min \\ -1 &\leq X \leq 1 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} y_2 &\rightarrow \min \\ -1 &\leq X \leq 1 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} y_3 &\rightarrow \min \\ -1 &\leq X \leq 1 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} y_4 &\rightarrow \min \\ -1 &\leq X \leq 1 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} y_5 &\rightarrow \min \\ -1 &\leq X \leq 1 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

где  $X = \begin{pmatrix} x1 \\ x2 \\ x3 \\ x4 \\ x5 \end{pmatrix}$

Результаты оптимизации, проведенной в вычислительной системе Mathcad-14 (с применением процедуры Given-Minimize) приведены в табл. 2.

Однако наибольший интерес представляют результаты оптимизации режима по требуемой категории качества (табл. 3). Постановка задачи оптимизации была следующей:

I категория качества:

$$\left. \begin{aligned} \tau_2 &\rightarrow \min \\ -1 &\leq X \leq 1 \\ B_{\min} &\geq 1,3 \\ S_w &\leq 0,01 \\ S_T &\leq 0,02 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

II категория качества:

$$\left. \begin{aligned} \tau_2 &\rightarrow \min \\ -1 &\leq X \leq 1 \\ B_{\min} &\geq 1,2 \\ S_w &\leq 0,015 \\ S_T &\leq 0,025 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

III категория качества:

$$\left. \begin{aligned} \tau_2 &\rightarrow \min \\ -1 &\leq X \leq 1 \\ B_{\min} &\geq 1,2 \\ S_w &\leq 0,02 \\ S_T &\leq 0,035 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Таблица 2 – Результаты оптимизации режима сушки по частным критериям

№ п/п	Управляющий фактор	Значения управляющих факторов для критериев оптимальности				
		$\tau_1$ (час)	$\tau_2$ (час)	$S_T$	$S_w$	$B_{\min}$
1	$u_{рн}$	0,1	0,1	0,18	0,18	0,18
2	$u_{рк}$	0,02	0,02	0,04	0,04	0,02
3	$u_{п1}$	0,2	0,174	0,1	0,1	0,1
4	$t_n, ^\circ C$	80	80	60	60,5	80
5	$t_k, ^\circ C$	92	100	100	99,5	100
Значение критерия оптимальности		90,8	120	0,011	0,088	2,039

Таблица 3 – Результаты оптимизации режимов сушки по категориям качества

№ п/п	Управляющий фактор / критерий качества	Значения управляющих факторов / критериев оптимальности		
		I	II	III
1	$u_{рн}$	0,168	0,11	0,1
2	$u_{рк}$	0,036	0,033	0,038
3	$u_{п1}$	0,1	0,1	0,2
4	$t_{п}, ^\circ\text{C}$	66,25	74,7	80
5	$t_{к}, ^\circ\text{C}$	100	100	100
6	$\tau_2$ (час)	247	179	143
7	$B_{\min}$	1,703	1,299	1,263
8	$S_{Г}$	0,019	0,03	0,035
9	$S_w$	0,01	0,015	0,02

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Режим сушки определяет все качественные показатели сушки древесины.
2. Целесообразно выбирать режим сушки, исходя из требуемой категории качества сушки, хотя действующие РТМ [4] это не предусматривают.
3. Выбор режима соответственно категории качества позволяет существенно снизить продолжительность сушки, а значит и расход энергии. Кроме того, это позволит иметь большую производительность камеры.
4. Высокое качество сушки (даже соответствующее I категории) может быть достигнуто без применения влаготепло- и кондиционирующей обработки пиломатериалов.

#### Библиографический список

1. Селюгин, Н.С. Сушка древесины [Текст] / Н.С. Селюгин. М.; Л.: Гослестехиздат, 1949.
2. Серговский, П.С. Гидротермическая обработка древесины [Текст] / П.С. Серговский. М.: Лесн. пром-сть, 1975.
3. Кречетов, И.В. Сушка древесины [Текст] / И.В. Кречетов. М.: Лесн. пром-сть, 1977.
4. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки древесины [Текст]. Архангельск: ЦНИИМОД, 1985.
5. Серговский, П.С. О рациональных режимах сушки пиломатериалов в воздушных камерах периодического действия [Текст] / П.С. Серговский // Деревообрабатывающая промышленность. 1969. № 2. С. 1 – 4.; № 3. С.1 – 4.
6. Серговский, П.С. О рациональных режимах сушки пиломатериалов в высокотемпературных сушилках [Текст] / П.С. Серговский // Деревообрабатывающая промышленность. 1962. № 1. С. 4 – 8.; № 2. С. 2 - 6.
7. Николайчук, М.В. Оптимальная степень насыщенности сушильного агента в процессе сушки пиломатериалов хвойных пород при пониженных температурах [Текст] / М.В. Николайчук // Механическая обработка древесины. 1973. № 1.

8. Красухина, Л.П. О рациональных режимах сушки березовых пиломатериалов в камерах периодического действия [Текст] / Л.П. Красухина // Деревообрабатывающая промышленность. 1988. № 6. С. 5 - 7.
9. Серговский, П.С. Новые режимы сушки осиновых пиломатериалов [Текст] / П.С. Серговский, А.А. Фахретдинов // Деревообрабатывающая промышленность. 1991. № 1. С. 4 - 7.
10. Руководящие технические материалы: Древесина. Показатели физико-механических свойств [Текст]. М.: Стандартгиз, 1962.
11. Гороховский, А.Г. Технология сушки пиломатериалов на основе моделирования и оптимизации процессов тепломассопереноса в древесине [Текст]: дисс. ... д-ра техн. наук / Гороховский Александр Григорьевич. СПб, 2008.
12. Лыков, А.В. О предельных переходах системы дифференциальных уравнений тепломассопереноса [Текст] / А.В. Лыков // Инженерно-физический журнал. 1973. Т. XXIV. № 1. С. 152 - 155.
13. Лыков, А.В. О системах дифференциальных уравнений тепломассопереноса в капиллярно-пористых телах [Текст] / А.В. Лыков // Инженерно-физический журнал. 1974. Т. XXVI. № 1. С. 18 - 25.
14. Смирнов, М.С. О системе дифференциальных уравнений процесса сушки [Текст] / М.С. Смирнов // Инженерно-физический журнал. Т. IV. № 9. С. 40 - 44.
15. Шубин, Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины [Текст] / Г.С Шубин. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 336 с.
16. Кирьянов, Д.В. Mathcad – 12 [Текст] / Д.В. Кирьянов. СПб.: БХВ – Петербург, 2005.
17. Гаврилова, Р.И. Исследование процесса сушки с переменными коэффициентами тепло- и массопереноса [Текст] / Р.И. Гаврилова // Инженерно-физический журнал. Т. VII. № 8. 1964. С. 37 - 42.
18. Логинов, Л.И. Численное интегрирование системы уравнений тепломассообмена с помощью неявных формул [Текст] / Л.И. Логинов, П.П. Юшков // Инженерно-физический журнал. Т. III. № 10. 1960. С. 93 - 108.
19. Юшков, П.П. О численном интегрировании уравнения теплопроводности в случае, когда термические коэффициенты зависят от температуры [Текст] / П.П. Юшков // Инженерно-физический журнал. Т. I. № 9. 1958. С. 102 - 108.
20. Уголев, Б.Н. Контроль напряжений при сушке древесины [Текст] / Б.Н. Уголев, Ю.Г. Лапшин, Е.В. Кротов. М.: Лесн. пром-сть. 1980. 206 с.
21. Пижурин, А. А. Основы моделирования и оптимизации процессов деревообработки [Текст] / А. А. Пижурин, М. С. Розенблит / М.: Лесная промышленность, 1988.
22. Пинчевская, Е.А. Прогнозирование уровня качества сушки пиломатериалов [Текст] / Е.А. Пинчевская // Деревообрабатывающая промышленность. 2008. № 3. С. 8 - 12.
23. Пинчевская, Е.А. Оценка качества сушки пиломатериалов с учетом изменчивости свойств материала и среды [Текст] / Е.А. Пинчевская // Деревообрабатывающая промышленность. 2008. № 4. С. 9 - 12.
24. Пен, Р.З. Статистические моделирования и оптимизации процессов ЦБП [Текст] / Р.З. Пен / Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та. 1982.