

УДК 674.047:66.047.45(075.8)

*А. Г. Гороховский, Е. Е. Шишкина, А. А. Гороховский***ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ**

*Рассмотрено влияние режима сушки на качество высушенной древесины. Разработана и приведена методика оптимизации режимов сушки по требуемой категории качества.*

**Ключевые слова:** оптимизация, режимы сушки пиломатериалов, показатели качества сушки.

**Введение.** 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.

Руководящие технические материалы (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 гг. прошлого века [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.

**Целью работы** является разработка методики аналитической оптимизации режимов конвективной сушки пиломатериалов в камерах периодического действия.

**Объектом исследований** явились структура и величины параметров режимов конвективной сушки пиломатериалов.

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:

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

где  $\sigma_{\text{пр.р.}}$  – расчетный предел прочности древесины;  
 $\sigma_{\text{макс}}$  – максимальная величина внутренних напряжений.

Оптимальной является (по мнению авторов) такая величина параметров сушильного агента ( $t$  и  $\varphi$ ), при которой  $B = 1$ . Если  $B < 1$ , то режим не обеспечивает сохранения целостности материала, если  $B > 1$ , то 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).

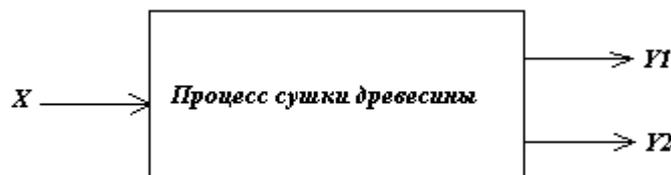


Рис. 1. Постановка задачи оптимизации процесса сушки древесины:  
 $X$  – вектор управляющих факторов;  $Y1$  – вектор параметров эффективности;  
 $Y2$  – вектор параметров качества

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:

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

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

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

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

Условие симметрии:

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

где  $t$  – температура, °С;

$u$  – влажность;

$\tau$  – время, с;

$a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;

$a_m$  – коэффициент влагопроводности, м<sup>2</sup>/с;

$\varepsilon$  – коэффициент фазового превращения;

$\rho$  – плотность древесины, кг/м<sup>3</sup>;

$c$  – теплоемкость древесины, кДж/(кг·град);

$\delta$  – термоградиентный коэффициент;

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

$R$  – половина толщины пластины, м;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град);

$\alpha$  – коэффициент теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·град);

$\alpha_m$  – коэффициент влагообмена, м/с;

$\rho_6$  – базисная плотность древесины, кг/м<sup>3</sup>;

$t_c$  – температура среды, °С;

$u_p$  – равновесная влажность древесины.

Для решения системы (2) – (8) разработано программное обеспечение (ПО) в вычислительной среде Mathcad – 14 [16] на основе неявного метода [17–19]. 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, °С;

$u_n$ ,  $u$  – 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  $u_{n1}$  и  $u_{n2}$ . Причем  $u_{n2} = 0,35$  и  $u_n = 0,6$  – оставались постоянными во всех опытах. Теплофизические характеристики древесины и среды определялись по известным выражениям Г.С. Шубина [15]. Переменные факторы при проведении эксперимента:  $u_{pn}$  ( $x_1$ ),  $u_{pk}$  ( $x_2$ ),  $u_{n1}$  ( $x_3$ ),  $t_n$  ( $x_4$ ),  $t_k$  ( $x_5$ ).

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  $W = 7\%$ ;

$S_T$  ( $y_3$ ) – перепад влажности по толщине доски [4];

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

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

Т а б л и ц а 1

Переменные факторы при проведении вычислительного эксперимента

Факторы	Значение фактора на уровнях					
	Нижний		Основной		Верхний	
	Кодир.	Натур.	Кодир.	Натур.	Кодир.	Натур.
$u_{\text{рн}}$ ( $x_1$ )	-	0,1	0	0,14	+	0,18
$u_{\text{рк}}$ ( $x_2$ )	-	0,02	0	0,03	+	0,04
$u_{\text{нл}}$ ( $x_3$ )	-	0,1	0	0,15	+	0,2
$t_{\text{н}}$ ( $x_4$ )	-	60	0	70	+	80
$t_{\text{к}}$ ( $x_5$ )	-	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 ( $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $S_T$ ,  $S_w$ ,  $V_{\min}$ ).

Постановка задач оптимизации была следующая:

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

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

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

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

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

$$\text{где } X = \begin{array}{|l} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{array}$$

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

Т а б л и ц а 2

## Результаты оптимизации режима сушки по частным критериям

Управляющий фактор	Значения управляющих факторов для критериев оптимальности				
	$\tau_1$ (час)	$\tau_2$ (час)	$S_T$	$S_w$	$B_{\min}$
$u_{рн}$	0,1	0,1	0,18	0,18	0,18
$u_{рк}$	0,02	0,02	0,04	0,04	0,02
$u_{п1}$	0,2	0,174	0,1	0,1	0,1
$t_{н}, ^\circ\text{C}$	80	80	60	60,5	80
$t_{к}, ^\circ\text{C}$	92	100	100	99,5	100
Значение критерия оптимальности	90,8	120	0,011	0,088	2,039

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

I категория качества:

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

II категория качества:

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

III категория качества:

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

Т а б л и ц а 3

## Результаты оптимизации режимов сушки по категориям качества

Управляющий фактор / критерий качества	Значения управляющих факторов / критериев оптимальности		
	I	II	III
$u_{рн}$	0,168	0,11	0,1
$u_{рк}$	0,036	0,033	0,038
$u_{п1}$	0,1	0,1	0,2
$t_{н}, ^\circ\text{C}$	66,25	74,7	80
$t_{к}, ^\circ\text{C}$	100	100	100
$\tau_2$ (час)	247	179	143
$B_{\min}$	1,703	1,299	1,263
$S_T$	0,019	0,03	0,035
$S_w$	0,01	0,015	0,02

На основании проведенных исследований можно сделать следующие **выводы**:

1. Целесообразно выбирать режим сушки, исходя из требуемой категории качества сушки, хотя действующие РТМ [4] это не предусматривают.

2. Выбор режима соответственно категории качества позволяет существенно снизить продолжительность сушки, а значит и расход энергии. Кроме того, это позволит иметь большую производительность камеры.

3. Высокое качество сушки (даже соответствующее I категории) может быть достигнуто без применения влаготепло- и кондиционирующей обработки пиломатериалов.

### Список литературы

1. Селюгин, Н.С. Сушка древесины / Н.С. Селюгин. – М.; Л.: Гослестехиздат, 1949. – 535 с.
2. Серговский, П.С. Гидротермическая обработка древесины / П.С. Серговский. – М.: Лесная промышленность, 1975. – 400 с.
3. Кречетов, И.В. Сушка древесины / И.В. Кречетов. – М.: Лесная промышленность, 1977. – 496 с.
4. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки древесины. – Архангельск: ЦНИИМОД, 1985. – 143 с.
5. Серговский, П.С. О рациональных режимах сушки пиломатериалов в воздушных камерах периодического действия / 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 сушилах / 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 / М.В. Николайчук // Механическая обработка древесины. – 1973. – № 1. – С. 7–9.
8. Красухина, Л.П. О рациональных режимах сушки березовых пиломатериалов в камерах периодического действия / Л.П. Красухина // Деревообрабатывающая промышленность. – 1988. – № 6. – С. 5–7.
9. Серговский, П.С. Новые режимы сушки осинового пиломатериала / П.С. Серговский, А.А. Фахретдинов // Деревообрабатывающая промышленность. – 1991. – № 1. – С. 4–7.
10. Руководящие технические материалы: Древесина. Показатели физико-механических свойств. – М.: Стандартгиз, 1962. – 48 с.
11. Гороховский, А.Г. Технология сушки пиломатериалов на основе моделирования и оптимизации процессов тепломассопереноса в древесине: дисс. ... д-ра техн. наук / Гороховский Александр Григорьевич. – СПб, 2008. – 263 с.
12. Лыков, А.В. О предельных переходах системы дифференциальных уравнений тепломассопереноса / 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 / А.В. Лыков // Инженерно-физический журнал. – 1974. – Т. XXVI. – № 1. – С. 18–25.
14. Смирнов, М.С. О системе дифференциальных уравнений процесса сушки / М.С. Смирнов // Инженерно-физический журнал. – 1961. – Т. IV. – № 9. – С. 40–44.
15. Шубин, Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины / Г.С. Шубин. – М.: Лесная промышленность, 1990. – 336 с.
16. Макаров, Е.Г. Mathcad: Учебный курс / Е.Г. Макаров. – СПб.: Питер, 2009. – 384 с.
17. Гаврилова, Р.И. Исследование процесса сушки с переменными коэффициентами тепло- и массопереноса / Р.И. Гаврилова // Инженерно-физический журнал. – 1964. – Т. VII. – № 8. – С. 37–42.
18. Логинов, Л.И. Численное интегрирование системы уравнений тепломассообмена с помощью неявных формул / Л.И. Логинов, П.П. Юшков // Инженерно-физический журнал. – 1960. – Т. III. – № 10. – С. 93–108.
19. Юшков, П.П. О численном интегрировании уравнения теплопроводности в случае, когда термические коэффициенты зависят от температуры / П.П. Юшков // Инженерно-физический журнал. – 1958. – Т. I. – № 9. – С. 102–108.
20. Уголев, Б.Н. Контроль напряжений при сушке древесины / Б.Н. Уголев, Ю.Г. Лапшин, Е.В. Кротов. – М.: Лесная промышленность, 1980. – 206 с.
21. Пижурин, А.А. Основы моделирования и оптимизации процессов деревообработки / А.А. Пижурин, М.С. Розенблит. – М.: Лесная промышленность, 1988. – 287 с.

22. Пинчевская, Е.А. Прогнозирование уровня качества сушки пиломатериалов / 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 / Е.А. Пинчевская // Деревообрабатывающая промышленность. – 2008. – № 4. – С. 9–12.
24. Пен, Р.З. Статистические моделирования и оптимизации процессов ЦБП / Р.З. Пен. – Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1982. – 352 с.

Статья поступила в редакцию 10.06.10.

*A.G. Gorokhovskiy, E.E. Shishkina, A.A. Gorokhovskiy*

### **OPTIMIZATION OF TIMBER DRYING SCHEDULES**

*Drying schedule impact on the dried timber quality is examined. The method of drying schedules optimization depending on the required quality class is developed.*

**Key words:** *optimization, timber drying schedules, drying quality indexes.*

---

*ГОРОХОВСКИЙ Александр Григорьевич* – доктор технических наук, заведующий кафедрой древесиноведения и специальной обработки древесины Уральского государственного лесотехнического университета. Область научных интересов – сушка древесины. Автор более 70 публикаций.

E-mail: niidrev@epn.ru

*ШИШКИНА Елена Евгеньевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры древесиноведения и специальной обработки древесины Уральского государственного лесотехнического университета. Область научных интересов – сушка древесины. Автор более 30 публикаций.

E-mail: elenashishkina@yandex.ru

*ГОРОХОВСКИЙ Александр Александрович* – аспирант кафедры древесиноведения и специальной обработки древесины Уральского государственного лесотехнического университета. Область научных интересов – сушка древесины. Автор пяти публикаций.

E-mail: niidrev@epn.ru