

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Обвинцев В. В., Солдатов А. В., Чамеев В. В.* Оптимизация продольного раскрыя круглых лесоматериалов методами линейного программирования в лесообработывающих цехах. – Екатеринбург: РИО УГЛТА, 1995. – 30 с.

2. *Чамеев В. В., Обвинцев В. В.* Комплекс-программа ZECH для решения задач анализа и синтеза в лесообработывающих цехах // Лесн. журн. – 1996. – № 4–5. – С. 168 – 175. – (Изв. высш. учеб. заведений).

3. *Чамеев В. В., Обвинцев В. В., Солдатов А. В.* База данных BADAN\_Z (Version 1.0). – Екатеринбург: РИО УГЛТА, 1995. – 10 с.

*V.V. Chameev, V.V. Obvintsev, D.M. Soldatov*

### **Management of Wood-processing Shops at the Wood-industrial Enterprises Based on the Complex Programme ZECH**

The schemes for solving the analysis and synthesis problems based on the complex programme ZECH are given, as well as work tables on planning the work of wood-processing shop.

УДК 674.047.(3)

***Ю.И. Тракало, В.Г. Кротов, В.В. Сергеев, Л.В. Кустадинчев, Д.С. Стрижаков***

Тракало Юрий Иосифович родился в 1963 г., окончил в 1988 г. Уральский лесотехнический институт, кандидат технических наук, декан факультета механической технологии древесины Уральской государственной лесотехнической академии. Имеет более 20 печатных трудов в области техники и технологии процессов сушки на предприятиях лесного комплекса.



Кротов Владислав Геннадьевич родился в 1937 г., окончил в 1959 г. Уральский лесотехнический институт, кандидат технических наук, профессор кафедры древесиноведения и специальной обработки древесины Уральской государственной лесотехнической академии.



Сергеев Валерий Васильевич родился в 1936 г., окончил в 1960 г. Уральский лесотехнический институт, доктор технических наук, старший научный сотрудник по специальности «Технология и оборудование деревообрабатывающих производств, древесиноведение», заведующий кафедрой древесиноведения и специальной обработки древесины Уральской государственной лесотехнической академии. Имеет более 70 печатных работ в области проблем техники и технологии сушки в малых лесосушильных камерах.



Кустадинчев Леонид Владимирович родился в 1976 г., окончил в 1999 г. Уральскую государственную лесотехническую академию, обучается в аспирантуре по специальности «Технология и оборудование деревообрабатывающих производств, древесиноведение».



Стрижаков Дмитрий Сергеевич родился в 1977 г., окончил в 1999 г. Уральскую государственную лесотехническую академию, обучается в аспирантуре по специальности «Технология и оборудование деревообрабатывающих производств, древесиноведение».



## **КИНЕТИКА СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ В КАМЕРАХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ**

Получены аналитические зависимости, характеризующие динамику изменения температуры и влагосодержания по толщине сортимента, которые могут явиться основой для расчетов напряженного состояния сортимента в процессе сушки-прогрева в малых лесосушильных камерах.

В камерах периодического действия, в которых условия среды изменяются во времени, а степень насыщенности агента сушки можно изменять только за счет влаги, испаряемой из материала, кинетика (средние значения потенциалов переноса) процесса в значительной мере определяется физико-химическими свойствами самого материала. Изменение локальной влажности и локальной температуры с течением времени зависит от взаимосвязанного механизма переноса влаги и тепла внутри материала и массо- и теплообмена его поверхности с окружающей средой.

В соответствии с выводами, изложенными в работах А.В. Лыкова, Г.С. Шубина и др. [1, 2], можно отметить, что явления теплообмена и изменение средней влажности материала носят сложный характер, который связан с одновременным прогревом материала и сушкой поверхностных слоев.

Таким образом, нестационарные поля влагосодержания и температуры (динамика процесса) определяются закономерностями влаго- и теплопереноса внутри тела, а также внешним влаго- и теплообменом с окружающей средой.

Исследования [1, 2], проведенные в этом направлении, позволили установить, что изменение средней влажности или среднего теплопереноса, в первую очередь зависят от закономерностей взаимодействия тела с окружающей средой, т. е. от внешнего тепло- и влагообмена и равновесной влажности древесины. Опишем аналитически динамику процесса.

Априорные сведения [2] и анализ экспериментальных данных позволяют составить следующее представление о механизме изменения полей влагосодержания и температуры в материале при переменных условиях среды. При влажности материала  $W_n > W_{н.г}$  (свежесрубленная древесина) температурное поле начинает быстро распространяться внутрь материала навстречу изменяющемуся полю влагосодержаний. Миграция влаги с поверхности тела в окружающую среду происходит очень быстро, благодаря ее испарительной способности ( $\varphi < 1$ ), и, достигнув уровня  $W = W_{н.г}$ , продолжает уменьшаться. Для таких пород древесины, как береза, при значительной скорости прогрева материала ( $H = (0,5 - 0,8)1/ч$ ) влажность поверхностного слоя может достигнуть конечной величины, и сушка замедлится. Произойдет так называемая «закалка» поверхности.

Учитывая, что в начальный период сушки для древесины критерий Лыкова [2] имеет незначительную величину, т.е.  $Lu \leq 0,003$ , можно предположить, что в толще материала возникают значительные температурные отрицательные градиенты. Часть влаги перемещается внутрь материала, увеличивая влагосодержание в центре, период постоянной скорости убыли влаги практически отсутствует, движение влаги происходит в виде пара, зона испарения постепенно заглубляется,  $\varepsilon$ -критерий фазового превращения постепенно увеличивается, достигая в конце процесса единицы.

Стадия массообменного регулярного режима, для которого скорость изменения влагосодержания во времени в зависимости от самого влагосодержания постоянна и не зависит от начальных условий, начинается при значениях критерия Фурье  $Fo' \geq 0,17$  (первый период), второй период отмечается при  $Fo' \geq 0,68$  и до конца процесса. Математическое описание такого нестационарного процесса очень сложно и сводится к решению следующей системы уравнений в критерияльной форме:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_c}{\partial Fo} &= \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} - \varepsilon K_0 \frac{\partial U}{\partial Fo}; \\ \frac{\partial U}{\partial Fo} &= Lu \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} - Lu P_n \frac{\partial^2 T}{\partial X^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $T_c$  – температура по сухому термометру;  
 $X = x/R$  – координаты в теле по толщине сортимента;  
 $R$  – гидравлический радиус;  
 $U$  – влагосодержание.

Данная система уравнений приведена в [1] для случая, когда температура среды изменяется по экспоненциальному или линейному законам.

В стадии теплового регулярного режима, когда закон изменения температуры описывается уравнением  $t_c = t_{c0} \exp(-Ht)$ , имеем тепло- и массообменные граничные условия:

$$\frac{\partial T(1, Fo)}{\partial X} - Bi[1 - \vartheta(1 - \exp[-Pd'Fo]) - T_c(1, Fo)] + (1 - \varepsilon)K_0 Lu Bi'[1 - U(1, Fo)] = 0; \quad (2)$$

$$-\frac{\partial U(1, Fo')}{\partial X} + P_n \frac{\partial T(1, Fo')}{\partial X} + Bi'[1 - U(1, Fo)] = 0,$$

где  $Bi$  и  $Pd$  – критерии Био и Предводилова;

$$\vartheta = \frac{t_{c0}}{t_{c0} - t_0} - \text{параметрический критерий температуры};$$

$t_0$  – начальная температура.

В обобщенном виде (2) для экспоненциальных задач выглядит следующим образом:

при определении полей влагосодержания

$$U(X, Fo') = \frac{U - U_p}{U_s - U_p} = 1 + \frac{\vartheta}{\varepsilon K_0} \sum_{i=1}^2 \bar{C}_i (1 - \vartheta_i^2) \Phi_{,,}(v_i \sqrt{Pd'X}) \exp(-Pd'Fo'); \quad (3)$$

при определении полей температур

$$T(X, Fo) = 1 - \vartheta \left[ 1 + \sum_{i=1}^2 \bar{C}_i \Phi_{,,}(v_i \sqrt{Pd'X}) \exp(-Pd'Fo) \right]; \quad (4)$$

$$C_1 = 2 \frac{G_1 P_2 + G_2 Q_2}{\mu_1 \Psi_1}; \quad C_2 = -2 \frac{G_1 P_1 + G_2 Q_1}{\mu_1 \Psi_1}; \quad (5)$$

$$\Psi_n = v_1 A_1 P_2 + v_2 B_2 Q_1 - v_2 A_2 P_1 - v_1 B_1 Q_2; \quad (6)$$

$$v_i^2 = \frac{1}{2} \left[ \left( 1 + \varepsilon K_0 P_n + \frac{1}{Lu} \right) + (-1)^i \sqrt{\left( 1 + \varepsilon K_0 P_n + \frac{1}{Lu} \right)^2 - \frac{4}{Lu}} \right]; \quad (7)$$

$$G_1 = 1 - \varepsilon K_0 K_1 - 2W \left( \frac{1}{Bi} - \frac{1}{\mu_1^2} \right) + 2 \varepsilon K_0 (P_n W - v) \frac{(1 + K_1) Lu}{\mu_1^2} + M; \quad (8)$$

$$G_2 = \varepsilon K'' + 2 \varepsilon K'' (P_n W - v) \left[ \frac{1}{Bi'} - \frac{Lu}{\mu_1^2} \right];$$

$$K_1 = \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} Lu \frac{Bi'}{Bi}; \quad (9)$$

$$\Phi_{,,}(v_i \mu_n X) = \cos v_i \mu_n X; \quad (10)$$

$$A_{ni} = \left[ 1 + \frac{1}{Bi} + K_1 (1 - v_i^2) \right] \sin v_i \mu_n + \frac{1}{Bi} \cos v_i \mu_n; \quad (11)$$

$$B_{ni} = (1 - v_i^2) \sin v_i \mu_i + \frac{(1 - v_i^2) + \varepsilon K_0 P_n}{Bi'} (\sin v_i \mu_i + v_i \mu_i \cos v_i \mu_n); \quad (12)$$

$$Q_{ni} = \left[ 1 + K_1 (1 - v_i^2) \right] \cos v_i \mu_1 - \frac{1}{Bi} v_i \mu_1 \sin v_i \mu_1; \quad (13)$$

$$P_{ni} = (1 - v_i^2) \cos v_i \mu_1 - \frac{(1 - v_i^2) + \varepsilon K_0 P_n}{Bi'} v_i \mu_1 \sin v_i \mu_1. \quad (14)$$

Численное определение коэффициентов тепло- и влагопереноса, входящих в уравнения (3), (4), было осуществлено при следующих допущениях, не вызывающих значительного влияния на свободные члены:

1) комплекс критериев, определенных из условий протекания процесса,  $\varepsilon K_0 P_n = 0,87 \cdot 0,06 \cdot 0,3 = 0,016 = \text{const}$ ;

2) параметрический критерий температуры  $\vartheta = 1$ , т. е.  $t_0 = t_n = 0 = \text{const}$ ;

3) критерий  $Lu = \frac{Fo'}{Fo} = 0,006$  определен для  $Fo = 66,9$  при критическом влагосодержании  $W = W_{nr} = 30\%$ ;

4) влагопроводность древесины – средняя для всего диапазона температур и влажностей, т. е.  $a' = 12 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cdot \text{с}^2/\text{с}$ ; температуропроводность  $\bar{a} = 1,7 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ .

При принятых допущениях значения корней и коэффициентов уравнений (3)–(14) приведены в таблице.

**Исходные данные для упрощенных расчетов тепло- и массопереноса в неограниченной пластине при  $t_c = t_{c_0} \exp(-H \tau)$ ,  $\tau = 0$ ,  $t_n = 0 = \text{const}$ ,  $W_r = V_r = 0$**

Показатели	Численные значения показателей
$Bi; Bi'$	11,0; 1,0
$\mu_1; \mu_1^2$	0,86; 0,74
$v_1^2; v_2^2; v_1; v_2$	1,0; 166,6; 1,0; 12,9
$P_1; P_2$	-0,0004; -378
$Q_1; Q_2$	0,998; 0,82
$B_1; B_2$	0,15; 12,5
$A_1; A_2; A'$	0,27; 1,02; -1,12
$G_1; G_2$	0,03; 0,05
$\Psi_n$	148,98
$C_1; C_2$	-0,95; -0,004
$Pd'; \chi$	0,01; 0,02

После подстановки численных значений коэффициентов и преобразования уравнений (3)–(14) последние принимают следующий вид: для поверхности сортифта

$$U_n = U_p + (U_n - U_p) \{0,03 \exp [(-0,02\tau) + (Pd' Fo')]\}; \quad (15)$$

$$t_n = t_0 + t_c [1 - 0,61 \exp (-Pd' Fo') - 0,29 \exp (-H\tau)]; \quad (16)$$

для центра сортимента

$$U_{\text{ц}} = U_{\text{р}} + (U_{\text{н}} - U_{\text{р}}) \{0,66 \exp [(-0,02\tau) + (Pd' Fo')]\}; \quad (17)$$

$$t_{\text{ц}} = t_0 + t_c [1 - 0,86 \exp (-Pd' Fo') - 0,14 \exp (-H\tau)], \quad (18)$$

где  $t_{\text{п}}$  и  $t_{\text{ц}}$  – температура поверхности и центра сортимента;  
 $U_{\text{н}}$  и  $U_{\text{р}}$  – начальное и равновесное влагосодержание.

По полученным выражениям были построены графики зависимостей  $t_{\text{с}}$ ,  $t_{\text{м}}$ ,  $W_{\text{р}}$ ,  $W_{\text{п}}$ ,  $W_{\text{ц}} = f(\tau)$  ( $t_{\text{м}}$  – температура по мокрому термометру), которые подтверждают сказанное ранее о том, что сушка древесины при переменных параметрах среды происходит в жестких условиях: перепады влагосодержания достигают значительных величин, которые могут привести к предельным значениям поверхностных напряжений.

Сдерживающим фактором такого роста является тепловая мощность камеры, регулируемая повышением температуры по сухому термометру. Таким образом, понизив температуру (следовательно, интенсивность сушки) в камере, можно предотвратить быстрый рост поверхностных напряжений в ущерб производительности установки.

#### Выводы

1. Математические зависимости, полученные из уравнения теплового баланса камеры и уравнения кинетики процесса, позволяют расчетным путем строить графики сушки с учетом тепловых мощностей камер и характеристик высушиваемой древесины.

2. Характер законов изменения температурных полей и влагосодержаний древесины в камере зависит от теплопроводности и закона изменения равновесной влажности древесины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 536 с.
2. Лурье М.Ю. Сушильное дело. – Л.: Кубуч, 1934. – 406 с.

*Yu.I. Trakalo, V.G. Krotov, V.V. Sergejev, L.V. Kustadinchev,  
 D.S. Strizhakov*

#### **Kinetics of Drying Wood in Drying Kilns of Low Capacity**

The analytical dependencies are obtained, characterizing the dynamics of temperature changing and moisture content based on the log thickness that may serve as the basis for calculating the stress state of the log in the process of drying-warming up in small drying kilns.