ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

№ 3 ЛЕСНОЙ ЖУРНАЛ 1988

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

УДК 674.047/049 : 536.24

ОБОБЩЕННАЯ СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ СРЕДЫ И ЕЕ РЕАЛИЗАЦИЯ НА ЭВМ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ

Г. С. ШУБИН

Московский лесотехнический институт

Ранее [8] отмечалось, что различные процессы сушки и тепловой обработки древесины можно отнести к двум категориям: 1) процессы, при которых фазовый переход происходит по всему объему одновременно или вообще отсутствует; 2) процессы, при которых границы фазовых переходов подвижны.

Выполненный анализ показал, что, несмотря на различия в процессах, имеется возможность описать их единой системой уравнений, приведенной ниже, которая является некоторой модификацией уравнений А. В. Лыкова для процесса сушки тела в виде пластины при углублении зоны испарения [1].

Представлялось также важным распространить эту систему уравнений на случай переменных по объему материала условий среды (например, при обработке в штабеле, пакете и т. п.), когда характер их изменения заранее неизвестен.

$$c_{1,2}\rho_{1,2}\frac{\partial t_{1,2}}{\partial t} = \mu(x)\frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda_{1,2}\frac{\partial t_{1,2}}{\partial x}\partial(x)\right] + \varepsilon_{1,2}\rho_0 r_\Phi \frac{\partial u_{1,2}}{\partial t} +$$

$$+ c_{\text{вл}1,2}\, q'_{1,2}\frac{\partial t_{1,2}}{\partial x}; \qquad (1)$$

$$\frac{\partial u_{1,2}}{\partial \tau} = \mu(x)\frac{\partial}{\partial x}\left[\left(a'_{1,2}\frac{\partial u_{1,2}}{\partial x} + a'_{1,2}\delta_{1,2}\frac{\partial t_{1,2}}{\partial x}\right)\partial(x)\right]; \qquad (2)$$

$$t_2(x,\ \tau=0) = f_t(x); \qquad (3)$$

$$u_2(x,\ \tau=0) = f_u(x); \qquad (4)$$

$$\alpha_1\left[t\big|_{x=0} - t_{c_1}(\tau)\right] - \lambda_1\frac{\partial t_1}{\partial x}\Big|_{x=0} - r_\Phi(1-\varepsilon_1)\,q'_1(\tau)\big|_{x=0} = 0; \qquad (5)$$

$$\alpha_2\left[t\big|_{x=l} - t_{c_2}(\tau)\right] - \lambda_2\frac{\partial t_2}{\partial x}\Big|_{x=0} - r_\Phi(1-\varepsilon_2)\,q'_2(\tau)\big|_{x=l} = 0; \qquad (6)$$

$$q'_1(\tau)\big|_{x=0} + a'_1\rho_0\frac{\partial u_1}{\partial x}\Big|_{x=0} + a'_1\rho_0\delta_1\frac{\partial t_1}{\partial x}\Big|_{x=0} = 0; \qquad (7)$$

$$q'_2(\tau)\big|_{x=l} + a'_2\rho_0\frac{\partial u_2}{\partial x}\Big|_{x=l} + a'_2\rho_0\delta_2\frac{\partial t_2}{\partial x}\Big|_{x=l} = 0; \qquad (8)$$

$$t_1(\tau)\big|_{x=\varkappa} = t_2(\tau)\big|_{x=\varkappa} = t_\Phi = \text{const}; \qquad (9)$$

$$u_1(\tau)\big|_{x=\varkappa} = u_2(\tau)\big|_{x=\varkappa} = u_{\text{п. н}} = \text{const}; \qquad (10)$$

$$\left(a_1' \frac{\partial u}{\partial x} + a_1'\delta_1 \frac{\partial t_1}{\partial x}\right)\Big|_{x=\varkappa} = \left(a_2' \frac{\partial u_2}{\partial x} + a_2'\delta_2 \frac{\partial t_2}{\partial x}\right)\Big|_{x=\varkappa}; \tag{11}$$

$$r_\phi \left[(1-\varepsilon_1)\, q_1'(\tau) - (1-\varepsilon_2)\, q_2'(\tau)\right] = \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x}\Big|_{x=\varkappa} - \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x}\Big|_{x=\varkappa}; \tag{12}$$

$$\frac{\partial t_{c_1}}{\partial z} = \frac{\alpha_1 (t \mid_{x=0} - t_{c_1})}{\omega_1 \rho_{c_1} c_{c_1} R_{\text{пр}}}; \tag{13}$$

$$\frac{\partial t_{c_2}}{\partial z} = \frac{\alpha_2 (t \mid_{x=l} - t_{c_2})}{\omega_2 \rho_{c_2} c_{c_2} R_{\text{пр}}}; \tag{14}$$

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial z} = \frac{a_1' \rho_0 (u \mid_{x=0} - u_{p_1})}{\omega_1 \rho_{\text{п. н}} R_{\text{пр}}} - \frac{\varphi_1}{R_\text{п}} \times$$

$$\times \left[\frac{(t_{c_1}+273)\dfrac{\partial p_{\text{п. н}_1}}{\partial z} - p_{\text{п. н}_1}\dfrac{\partial t_1}{\partial z}}{(t_{c_1}+273)^2}\right] \frac{1}{\rho_{\text{п. н}_1}}; \tag{15}$$

$$\frac{\partial \varphi_2}{\partial z} = \frac{a_2' \rho_0 (u \mid_{x=l} - u_{p_2})}{\omega_2 \rho_{\text{п. н}_2} R_{\text{пр}}} - \frac{\varphi_2}{R_\text{п}} \times$$

$$\times \left[\frac{(t_{c_2}+273)\dfrac{\partial p_{\text{п. н}_2}}{\partial z} - p_{\text{п. н}_2}\dfrac{\partial t_2}{\partial z}}{(t_{c_2}+273)^2}\right] \frac{1}{\rho_{\text{п. н}_2}}. \tag{16}$$

В уравнениях (1)—(16) обозначено:

$c_{1,2}$, $\lambda_{1,2}$, $\rho_{1,2}$ — соответственно удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности и плотность материала в его зонах *1* и *2* по сечению (рис. 1, *а*);

$t_{1,2}$ и $u_{1,2}$ — температура и влагосодержание материала ($u = \frac{W}{100}$, где W — влажность, %);

ρ_0 — плотность сухого материала;

$\mu(x)$ и $\partial(x)$ — параметры формы тела;

ε — критерий фазового перехода;

$a'_{1,2}$ и $\delta_{1,2}$ — коэффициенты влагопроводности и термовлагопроводности;

τ — время;

x и $\varkappa$ — соответственно координата по сечению материала и координата, на которой происходит фазовый переход;

α_1 и α_2 — коэффициенты теплообмена на внешних поверхностях *1* ($x = 0$) и *2* ($x = l$) материала (рис. 1, *б*);

$c_{\text{вл}1,2}$ — теплоемкость переносимой внутри тела влаги;

$t_{c1,2}$ — температура среды;

r_ϕ — теплота фазового перехода;

$q'_{1,2}$ — поток влаги к поверхностям тела;

t_ϕ — температура фазового перехода;

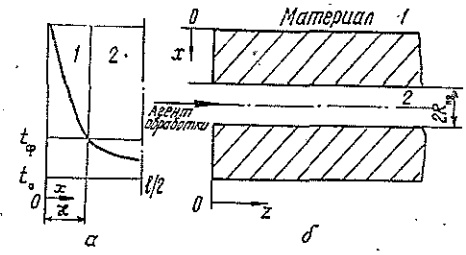
$u_{\text{п. н}}$ — максимальное гигроскопическое влагосодержание (предел насыщения клеточных стенок);

z — координата в направлении движения агента обработки (рис. 1, *б*);

$2R_{\text{пр}}$ — зазор между материалом для прохода агента обработки (например, толщина прокладки);

ω, ρ_c, c_c, φ — скорость, плотность, удельная теплоемкость и степень насыщенности агента обработки;

Рис. 1. К математическому описанию процесса: *а* — в материале (пластина, цилиндр *1* — оттаявшая зона, *2* — замороженная зона); *б* — в объеме материала



$u_р$ — равновесное влагосодержание;

$p_{п.н}$ и $\rho_{п.н}$ — давление и плотность насыщенного пара;

$R_п$ — газовая постоянная пара.

В приведенной системе:

(1) и (2) — дифференциальные уравнения тепло- и массопереноса в зонах *1* и *2* по сечению материала;

(3) и (4) — начальные условия;

(5)—(8) — граничные условия (ГУ) III рода на внешних поверхностях *1* и *2* тела: (5) и (6) — по теплу, (7) и (8) — по влаге;

(9) и (10) — условия равенства температуры и влагосодержания;

(11) и (12) — уравнения потоков влаги и тепла на границе фазового перехода;

(13)—(16) — балансовые дифференциальные уравнения изменения температуры среды (13), (14) и степени ее насыщенности (15), (16), выведенные нами для случая сушки и тепловой обработки материала в слое, пакете (штабеле).

При одинаковых условиях среды для каждой стороны материала (например, доски) исключают уравнения (6), (8), (14), (16), а в выражениях (5), (7), (13) и (15) — индекс 1. Из уравнений (9) и (10) следует, что система записана для случая постоянного значения параметров фазового перехода ($t_ф$ и $u_{п.н}$).

Приведенная обобщенная система нелинейных уравнений тепломассопереноса, кроме учета переменных условий среды (что позволяет рассматривать процессы в любом месте по объему слоя или штабеля материала), обобщена на случай цилиндра, когда параметры $\mu(x) = \frac{1}{x}$ и $\nu(x) = x$ (для пластины $\mu(x) = 1$ и $\nu(x) = 1$). Эта система предусматривает несимметричные граничные условия на внешних поверхностях, включает конвективный член $c_{вл_{1,2}} q'_{1,2} \frac{\partial t_{1,2}}{\partial x}$ (который учитывает перенос тепла влагой) и позволяет как частные случаи получать записи уравнений переноса и краевых условий для процессов с подвижными границами (применительно к древесине — оттаивание и промерзание, низко- высокотемпературная сушка при $W > W_{п.н}$) и для процессов, не сопровождаемых движением границы фазовых переходов. В случае неоднородного строения тела по сечению (например, ядро и заболонь в древесине) уравнения формулируют с ГУ IV рода, а при однородном строении — с ГУ III и I рода.

Приведем несколько примеров.

1. При оттаивании (процесс с подвижными границами) поле влажности стабильно: $\frac{\partial u}{\partial \tau} = 0$ и $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$, выпадают уравнения (2), (4), (7), (8), (10), (11); $\varepsilon_1 \equiv \equiv \varepsilon_{льда}$; $\varepsilon_2 = 0$ (зона *2* полностью заморожена, фазового перехода в ней нет, $\varepsilon_1 = 1$,

оттаявшая зона разморожена, фазовый переход произошел в ней полностью). Тогда для симметричной пластины

$$c_{1,2}\rho_{1,2}\frac{\partial t_{1,2}}{\partial\tau}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_{1,2}\frac{\partial t_{1,2}}{\partial x}\right); \tag{17}$$

$$t_2(x,\ \tau=0)=f_t(x); \tag{18}$$

$$\alpha_1\left(t_{c_1}-t\,|_{x=0}\right)+\lambda_1\frac{\partial t_1}{\partial x}\bigg|_{x=0}; \tag{19}$$

$$\frac{\partial t_2}{\partial x}\bigg|_{x=\frac{l}{2}}=0; \tag{20}$$

$$t_1(\tau)\,|_{x=\varkappa}=t_2(\tau)\,|_{x=\varkappa}=t_ф=\mathrm{const}; \tag{21}$$

$$\lambda_2\frac{\partial t_2}{\partial x}\bigg|_{x=\varkappa}-\lambda_1\frac{\partial t_1}{\partial x}\bigg|_{x=\varkappa}=r_ф q_2'(\tau)=r_ф\rho_ф\frac{\partial\varkappa}{\partial\tau}. \tag{22}$$

По своему физическому смыслу правая часть в уравнении (22) $r_ф q_2'(\tau)$, характеризующая расход тепла, в данном случае должна быть записана в виде $r_ф\rho_ф\frac{\partial\varkappa}{\partial\tau}$ (где $\rho_ф$ — масса льда, превращаемого в воду):

$$\rho_ф=\rho_{усл}\left(u-u_{г.\,ж}\right). \tag{23}$$

Здесь $u_{г.\,ж}$ — количество не замерзающей в древесине влаги [4].

В такой записи уравнение (22) превращается в известное условие Стефана.

2. При низкотемпературном процессе сушки и $u_н>u_{п.\,н}$ имеет место движение границы фазовых превращений на уровне $u=u_{п.\,н}$. Поле температуры после прогрева практически стабильно. Тогда $\frac{\partial t}{\partial\tau}=0$ и $\frac{\partial t}{\partial x}=0$. Из системы выпадают все уравнения, связанные с температурным полем; остается (уравнение влагопереноса приведем для случая без термовлагопроводности):

$$\frac{\partial u_{1,2}}{\partial\tau}=\frac{\partial}{\partial x}\left(a_{1,2}'\frac{\partial u_{1,2}}{\partial x}\right); \tag{24}$$

$$q_1'(\tau)\,|_{x=0}=a_1'\rho_0\frac{\partial u_1}{\partial x}\bigg|_{x=0}; \tag{25}$$

$$u_1(\tau)\,|_{x=\varkappa}=u_2(\tau)\,|_{x=\varkappa}=u_{п.\,н}=\mathrm{const}; \tag{26}$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial x}\bigg|_{x=\frac{l}{2}}=0; \tag{27}$$

$$u_2(x)=f_u(x); \tag{28}$$

$$a_2'\frac{\partial u_2}{\partial x}-a_1'\frac{\partial u_1}{\partial x}=0. \tag{29}$$

Нетрудно видеть, что система уравнений (24)—(29) совпадает по форме с системой (17)—(22). Уравнение (29) по структуре несколько отличается от условия Стефана (22). Однако можно привести его к такому же виду, приняв a' отдельно для жидкой $a_{2,\,ж}'$ и паровой $a_{1,\,п}'$ фазы:

$$a_{2,\,ж}'\rho_0\frac{\partial u_2}{\partial x}\bigg|_{x=\varkappa}-a_{1,\,п}'\rho_0\frac{\partial u_1}{\partial x}\bigg|_{x=\varkappa}=\rho_ф\frac{\partial\varkappa}{\partial\tau}. \tag{30}$$

3. Нагревание при начальной температуре древесины $t_0>0$ (процесс без фазовых переходов). Поле влажности стабильно, $\frac{\partial\varkappa}{\partial\tau}=0$. Если тело неоднородно (например, при наличии ядра — *1* и заболони — *2*), то $\lambda_1\neq\lambda_2$, дифференциальное уравнение теплопереноса примет вид выражения (17), а условие Стефана (22) — вид ГУ IV рода:

$$\lambda_2\frac{\partial t_2}{\partial x}\bigg|_{x=\varkappa}=\lambda_1\frac{\partial t_1}{\partial x}\bigg|_{x=\varkappa}, \tag{31}$$

где $\varkappa$ — толщина тела *1*.

При однородном теле ($\lambda_1 = \lambda_2$) уравнение (31) превращается в тождество, а в равенстве (17) пропадают индексы 1 и 2, и оно превращается в обычное дифференциальное уравнение теплопроводности.

Аналогично получают выражения для низкотемпературного процесса сушки при $W < W_{\text{п. н}}$.

В связи с нелинейностью сформулированной выше системы уравнений (1)—(16) она не имеет аналитического решения. Однако решение может быть получено численно и реализовано на ЭВМ.

Для практических расчетов были разработаны две программы: 1) для задач с подвижными границами фазового перехода (пластина, цилиндр) при переменных коэффициентах, например, оттаивание (промерзание), высокотемпературная сушка; 2) для задач без подвижных границ применительно к пластине при переменных условиях среды и переменных коэффициентах с добавлением уравнения (35), характеризующего изменение внутренних напряжений и предложенного Б. Н. Уголевым [3]. Обе программы базируются на системах уравнений, которые являются частными случаями общей системы (1)—(16).

Остановимся на анализе второго случая. Система уравнений включает в себя [5] (полную запись опускаем): дифференциальные уравнения для температурного (1) и влажностного полей (2) однородной пластины; начальные условия (3), (4); условия симметрии тела (начало отсчета от оси)

$$\left.\frac{\partial t}{\partial x}\right|_{x=0} = 0; \tag{32}$$

$$\left.\frac{\partial u}{\partial x}\right|_{x=0} = 0; \tag{33}$$

симметричные граничные условия для тепла (5) и для влаги (7), поток которой q' записан в виде:

$$q'(\tau) = \alpha'\rho_0 \left[u\big|_{x=R} - u_{\text{р}}(\tau)\right]; \tag{34}$$

уравнение изменения внутренних напряжений

$$\Delta\sigma_j = \frac{\sum\limits_{i=1}^{m} \left[\left(\alpha_{\text{у}}(u_i)\,\Delta u_i - \alpha_{\text{у}}(u_j)\,\Delta u_j\right) E(u_i,\ t_i)\right]}{\sum\limits_{i=1}^{m} E(u_i,\ t_i)}\, E(u_j,\ t_j); \tag{35}$$

дифференциальные уравнения изменения температуры среды $t_{\text{с}}$ и степени ее насыщенности φ в виде соотношений (13) и (15) (одинаковые условия по разные стороны пластины).

В уравнениях (34), (35) введены обозначения:

α' — коэффициент влагообмена;
$\alpha_{\text{у}}$ — коэффициент усушки;
Δu — изменение влагосодержания;
E — модуль упругости;
j — относится к исследуемому слою;
$i = 1, 2, 3, \ldots, j, \ldots, m$.

Уравнение (35) характеризует приращение за данный временной шаг напряжений в любом слое многослойной модели, однозначно определяемое изменением u и t в теле.

Программа расчетов по описанной системе уравнений была реализована на ЭЦВМ ЕС-1060. Эта система достаточно сложна для практического использования. Сложность состоит в необходимости располагать большим набором переносных и термодинамических параметров, которые в большинстве случаев зависят от потенциалов. Это сразу переводит уравнения в разряд нелинейных. Система включает в себя неизотермический перенос массы, предполагает многомерность тел. Наконец, в уравнение температурного поля (1) входит критерий фазового перехода ε, характеризующий долю воды, испаряемой внутри тела. Этот параметр (имеет значения от 0 до 1) зависит от условий процесса и трудно определим. Для его описания фактически требуется дополнительное уравнение. Поэтому целесообразно оценить вклад члена, включающего ε, в характерные параметры процесса и термовлагопроводности в суммарный влагоперенос. (Вопросы учета многомерности рассмотрены в работах [6, 7, 9]).

Расчеты системы на ЭВМ позволили ответить на поставленные вопросы. При расчетах использованы аппроксимации из работы [10].

В таблице приведены значения $\overline{W}$, $t_п$, $W_п$, $\sigma_п$, $\sigma_ц$, $t_ц$, $W_ц$ ($\overline{W}$ — средняя по сечению влажность, индекс п — поверхность, ц — центр) для различных периодов сушки доски τ (бук, толщина $s = 40$ мм, $W_н = 60$ %, $\omega = 2$ м/с) при нормальном режиме и разных значениях ε (0; 0,5; 1,0).

ε	$\overline{W}$, %	$W_п$, %	$W_ц$, %	$t_п$, °C	$t_ц$, °C	$\sigma_п$, МПа	$\sigma_ц$, МПа
0	55,28 / 32,54	18,40 / 15,83	72,84 / 41,59	56,63 / 60,96	56,66 / 60,94	1,887 / 2,192	—0,144 / —0,498
0,5	55,27 / 32,65	18,34 / 15,83	72,92 / 41,78	56,66 / 60,96	56,16 / 60,69	1,89 / 2,188	—0,145 / —0,495
1,0	55,49 / 32,82	18,32 / 15,83	73,27 / 42,07	56,62 / 60,94	55,61 / 60,44	1,888 / 2,184	—0,146 / —0,494

Примечание. В числителе данные для $\tau = 5,2$ ч; в знаменателе — $\tau = 27,2$ ч.

Из данных таблицы видно, что ε оказывает большее влияние на различные показатели в центральной зоне материала, и в расчеты может быть введено любое его значение; перепады температуры по толщине невелики, и процесс низкотемпературной сушки можно приближенно рассматривать как изотермический.

Термовлагопроводность оценивали при помощи расчетов на ЭВМ, а также путем сопоставления опытных данных и аналитических расчетов. В последнем случае использовали систему уравнений тепломассопереноса в критериальном виде [2], в решение которой среди других параметров входит средний по сечению потенциал переноса влаги $\overline{\theta}'$ (аналог влагосодержания) и критерий Поснова $Pn = \delta \frac{\Delta t}{\Delta u}$ (Δt и Δu — перепады температуры и влагосодержания). Сопоставляли значения $\overline{\theta}'$ при получающихся в опытах значениях Pn (данные по коэффициентам термовлагопроводности δ принимали из работы [7]) и при $Pn = 0$, когда термовлагопроводность отсутствует.

Результаты сопоставления расчетных (на ЭВМ и аналитических) и опытных данных показали, что термовлагопроводность, способствуя переносу влаги сразу после прогрева, задерживает перенос при сушке на 0...8 %. Из этого следует, что для практических расчетов сушки термовлагопроводность в большинстве случаев можно не учитывать, что не относится к специальным случаям (например, при осциллирующей сушке материалов или начальной обработке пиломатериалов при температуре среды, существенно превышающей температуру при последующей сушке).

На рис. 2 приведены полученные при решении описанной системы уравнений на ЭВМ графики изменения влажности, температуры, внут-

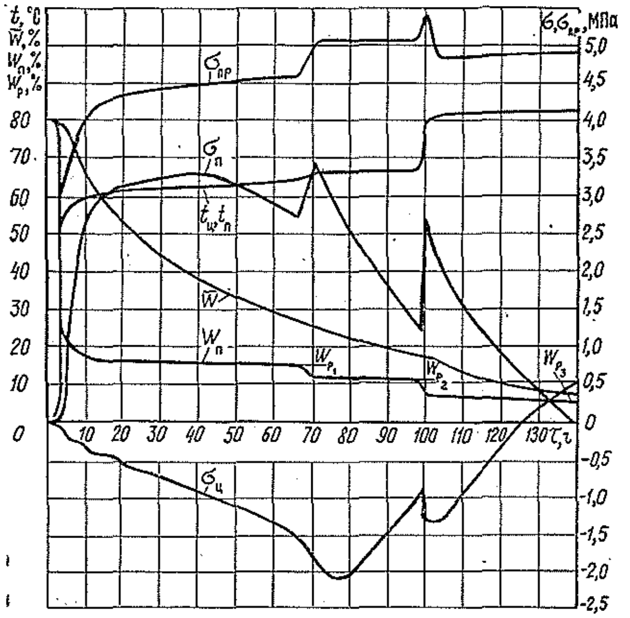


Рис. 2. Графики $\overline{W} = f(\tau)$, $W_п = f(\tau)$, $t_п = f(\tau)$, $t_ц = f(\tau)$, $\sigma_п = f(\tau)$, $\sigma_ц = f(\tau)$, $\sigma_{пр} = f(\tau)$ во время сушки

ренних напряжений и предела прочности во времени для пиломатериалов (бук, $s = 25$ мм, режим 5В, $\omega = 2$ м/с), находящихся в первом, ближайшем к входу воздуха, боковом ряду штабеля, а на рис. 3 — графики изменения степени насыщенности среды φ (*а*) и ее температуры $t_с$ (*б*) по ширине штабеля во время сушки (сосна, $s = 25$ мм, режим 3Г, нереверсивная циркуляция ($\omega = 2$ м/с)).

Графики рис. 2 показывают закономерный характер изменения влажности и внутренних напряжений во времени. При этом поверхностная влажность на каждой ступени сушки длительное время близка к равновесной, что характерно для ГУ I рода, являющихся частным случаем ГУ III рода, при которых решали задачу.

Графики рис. 3 подтверждают адекватность приведенной выше математической модели, что видно, в частности, из вполне удовлетво-

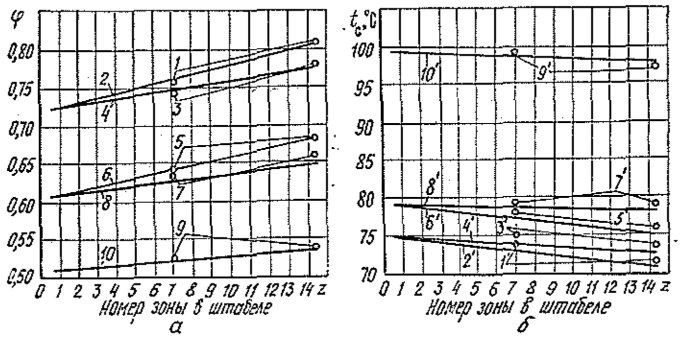


Рис. 3. *1* и *1′* — $\tau = 19{,}1$ ч; *2* и *2′* — 20,37; *3* и *3′* — 26,3; *4* и *4′* — 27,57; *5* и *5′* — 28,3; *6* и *6′* — 28,33; *7* и *7′* — 32,3; *8* и *8′* — 33,476; *9* и *9′* — 42,3; *10* и *10′* — 42,382 ч

рительного совпадения кривых изменения температуры среды t_c и степени ее насыщенности φ в штабеле, рассчитанных на ЭВМ по программе 2 (сплошные линии), с расчетами (кружочки), выполненными позонно-интервальным методом (штабель разбивали на зоны, к каждой из которых применяли уравнения при постоянных условиях; полученные на входе из зоны параметры принимали равными параметрам на входе в следующую зону). При этом время при счете на ЭВМ и в аналитическом расчетном методе не всегда точно совпадало. В работе [5] показано также вполне удовлетворительное совпадение расчетных кривых сушки в разных зонах штабеля, полученных на ЭВМ и позонно-интервальным методом.

Расчеты по программе, разработанной на базе уравнений (1)—(4), (13), (15), (32)—(35), позволяют решать круг технологических задач по сушке и нагреванию древесины как в виде единичных сортиментов, так и в объеме штабеля.

ЛИТЕРАТУРА

[1]. Лыков А. В. Теория сушки.— М.: Энергия, 1968. [2]. Лыков А. В., Михайлов Ю. А. Теория тепло- и массопереноса.— М.: Госэнергоиздат, 1963. [3]. Уголев Б. Н., Лапшин Ю. Г., Кротов Е. В. Контроль напряжений при сушке древесины.— М.: Лесн. пром-сть, 1980. [4]. Чудинов Б. С. Теория тепловой обработки древесины.— М.: Наука, 1968. [5]. Шубин Г. С. Метод расчета длительности кондиционирующей обработки пиломатериалов после сушки // Лесн. журн.— 1987.— № 3. (Изв. высш. учеб. заведений). [6]. Шубин Г. С. Особенности и метод расчета процессов сушки и нагревания древесины с учетом многомерности и анизотропии // Актуальные направления развития сушки древесины: Всесоюз. конф.— Архангельск.— 1980. [7]. Шубин Г. С. Проектирование установок для гидротермической обработки древесины.— М.: Лесн. пром-сть, 1983. [8]. Шубин Г. С. Совершенствование методов расчета процессов нагревания и сушки древесины и их обобщение // Деревообраб. пром-сть.— 1980.— № 6. [9]. Шубин Г. С. Физические особенности и расчет процессов сушки древесины.— М.: Лесн. пром-сть, 1973. [10]. Шубин Г. С., Чемоданов А. В. Основные аппроксимирующие функции для программы счета на ЭЦВМ процессов нагревания и сушки древесины // Науч. тр. / МЛТИ.— 1985.— Вып. 170.

Поступила 15 июня 1987 г.

УДК 674.053 : 621.933.61

ЭФФЕКТИВНОСТЬ УПРОЧНЕНИЯ БОКОВИН ПОПЕРЕЧИН ПИЛЬНОЙ РАМКИ ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Л. А. ШАБАЛИН, В. Ф. ВИНОГРАДОВ, В. И. СМИРНОВ, Н. Ф. РЯБУХИН

Уральский лесотехнический институт
Даниловский ЗДС

При эксплуатации одноэтажных лесопильных рам наблюдаются остаточные прогибы боковин нижних поперечин пильных рамок (ПР), вызывающие заклинивание ползунов в направляющих, чрезмерный их нагрев, быстрый износ и дополнительный расход мощности. Кроме того, возрастают напряжения в стойках из-за внецентренного сжатия и возникает необходимость уменьшения длины пил между опорными планками.

Для выяснения причин остаточных прогибов поперечин были проведены экспериментальные тензометрические исследования напряженного состояния элементов ПР наиболее распространенной модели лесорамы Р63-4А. Напряжения с помощью 87 тензодатчиков измеряли от статических сил (натяжения пил и распора струбцин) и осциллографировали в период разгона, холостого режима работы, пиления и выбега.

На рис. 1 приведены экспериментальные эпюры максимальных нормальных напряжений, МПа, возникающих в элементах ПР от ста-