УДК 674.047

Я.И. Соколовский, М.В. Дендюк, Б.П. Поберейко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СУШКЕ ДРЕВЕСИНЫ

Предложена математическая модель определения напряженно-деформационного состояния древесины при сушке с учетом ее вязкоупругих свойств и анизотропии.

Ключевые слова: древесина, сушка, влагосодержание, вязкоупругость, напряженно-деформационное состояние, метод конечных элементов.

Актуальность исследований. Разработка новых и усовершенствование существующих прогрессивных технологий сушки древесины остро ставит проблему разработки универсальных методов синтеза и анализа деформационно-релаксационных и тепломассообменных полей. Значительные по величине напряжения – это основной сдерживающий фактор для интенсификации процесса сушки. Решение данной проблемы затруднено, так как древесина относится к классу физически нелинейных гидрофильных полимеров, которые характеризируются значительной изменчивостью структурных и физико-механических свойств.

Анализ известных исследований. Реологическое поведение древесины в процессе сушки рассмотрено в большом количестве работ теоретического и экспериментального характера, обширный анализ которых приведен в работе [11]. Напряжения и деформации, возникающие в высушиваемой древесине, проанализированы на расчетных стержневых одноосных моделях [6, 10, 12] с учетом зависимости модуля упругости древесины от влаги. Числовые методы позволяют решить плоскую задачу напряжено-деформационного состояния пиломатериалов при сушке [4, 12]. Такие же задачи, только с учетом анизотропии механических свойств материала, рассмотрены в работах [8, 15, 22]. В работах [20, 21] использован характерный подход, связанный с существованием особого механизма создания механико-сорбционной ползучести и выявленного для условий циклического изменения влажности нагруженной древесины. Особенности деформирования древесины с учетом ее вязкоупругих свойств в рамках одномерной задачи изучены в работах [8–10, 17]. Взаимосвязь деформационно-релаксационных и тепломассообменных процессов рассмотрена в [7].

В данной работе методом конечных элементов (МКЭ) рассмотрено напряженно-деформационное состояние высушиваемой древесины как двухмерного анизотропного материала с учетом его реологических свойств. Здесь проведено обобщение МКЭ для определения напряжений в вязкоупругой области деформирования двухмерного анизотропного материала. Данные результаты явились продолжением исследований [16, 19], в которых

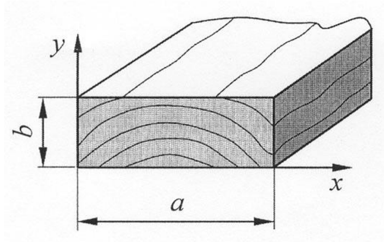

Рис. 1. Схема для постановки задачи

с помощью МКЭ рассматривали нестационарное температурно-влажностное поле древесины с учетом анизотропии теплофизических свойств материала.

Постановка задачи и математическая модель. Определение напряженно-деформационного состояния древесины в процессе сушки базируется на моделировании связи деформационно-релаксационных и массообменных процессов с использованием общих положений термодинамики необратимых процессов и методов механики сплошной среды. Для двухмерной задачи (рис. 1) связь между компонентами напряжений σ(t) и деформаций ε(t) выражают интегральными уравнениями наследственной теории Больцмана–Вольтерры [3]:

$$\sigma_{11}(t)=C_{1111}\varepsilon'_{11}-C_{1111}\int_0^t R_{1111}(t-\tau)\varepsilon'_{11}(\tau)d\tau+C_{1122}\varepsilon'_{22}-C_{1122}\int_0^t R_{1122}(t-\tau)\varepsilon'_{22}(\tau)d\tau; \quad (1)$$

$$\sigma_{22}(t)=C_{2211}\varepsilon'_{11}-C_{2211}\int_0^t R_{2211}(t-\tau)\varepsilon'_{11}(\tau)d\tau+C_{2222}\varepsilon'_{22}-C_{2222}\int_0^t R_{2222}(t-\tau)\varepsilon'_{22}d\tau; \quad (2)$$

$$\sigma_{12}(t)=2C_{1212}\varepsilon'_{12}-2C_{1212}\int_0^t R_{1212}(t-\tau)\varepsilon'_{12}(\tau)d\tau, \quad (3)$$

где σ_{ij} – компоненты напряжений;

ε'_{ij} – компоненты тензоров деформаций, вызванные изменением влаги в материале;

$R(t-\tau)$ – ядра релаксации;

C – компоненты тензоров упругих постоянных,

$$C_{1111}=\frac{E_{1111}}{1-\nu_1\nu_2};\quad C_{1122}=C_{2211}=\frac{\nu_1 E_{2222}}{1-\nu_1\nu_2};\quad C_{2222}=\frac{E_{2222}}{1-\nu_1\nu_2};\quad 2C_{1212}=\mu;$$

μ – модуль сдвига;

E – модуль упругости;

ν – коэффициент Пуассона.

Общепринятая формулировка МКЭ [2, 5] предполагает отыскание поля перемещений и связана с минимизацией потенциальной энергии системы на основе расчета узловых значений вектора перемещений. После того, как перемещения будут определены, рассчитывают компоненты тензоров деформаций {ε} и напряжений{G}.

Энергию деформации бесконечно малого объема dV определяют по формуле

$$d\Lambda = \frac{1}{2}\left[\{\varepsilon\}^{\mathrm{T}}\{\sigma\} - \{\varepsilon_0\}^{\mathrm{T}}\{\sigma\}\right],$$

где Т – операция транспонирования.

Полную энергию деформации получают интегрированием по объему тела:

$$\Lambda = \int_V \frac{1}{2}\left[\{\varepsilon\}^{\mathrm{T}}\{\sigma\} - \{\varepsilon_0\}^{\mathrm{T}}\{\sigma\}\right] dV. \quad (4)$$

Компоненты тензора деформаций $\{\varepsilon_0\}$, вызванные усадкой материала при удалении влаги в процессе сушки с учетом анизотропии, определяют из следующей зависимости [10, 12]:

$$\{\varepsilon_0\}^{\mathrm{T}} = \{K_\beta\}^{\mathrm{T}} \Delta U, \quad (5)$$

где $\{K_\beta\}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} K_{\beta_{11}} & K_{\beta_{22}} & 0 \end{bmatrix}$ – коэффициенты тензора усадки в направлениях осей анизотропии;

ΔU – изменение влагосодержания U за промежуток времени $\Delta\tau$.

Для описания нестационарного влагопереноса в процессе сушки древесины на этапе удаления связанной влаги используют уравнение [13] с граничными условиями 3-го рода $U = U_{\mathrm{В}}(S)$, $\alpha \frac{\partial U}{\partial n} = \beta(U_{\Pi} - U_R)$ и начальным условием $U|_{\tau=0} = U_0$:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = \alpha_x \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \alpha_y \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}, \quad (6)$$

где

$U_{\mathrm{В}}(S)$ – влагосодержание на поверхности, которое может быть функцией координат;

n – внешняя нормаль;

β – коэффициент влагоотдачи , м/с^2;

U_{Π} и U_R – влагосодержание на поверхности и равновесное.

α_x, α_y – коэффициенты влагопроводности вдоль осей анизотропии, м/с^2.

В процессе сушки начальное распределение влаги U_0 принимают равномерным (U_0 = const), на этапе регулярного процесса (критерий Фурье $\mathrm{F}_0 = 0{,}1$) – параболическим:

$$U\big|_{\mathrm{F}_0=0,1} = U_{\text{Ц}} - \left[1 - \left(\frac{x - a/2}{a/2}\right)^2\right]\left[1 - \left(\frac{y - b/2}{b/2}\right)^2\right](U_{\text{Ц}} - U_{\Pi}),$$

где $U_{\text{Ц}}$ – влагосодержание в центре пиломатериала.

Обобщение метода конечных элементов на вязкоупругую область деформирования древесины и числовая реализация. Для определения вязкоупругих компонент деформаций используем закон Больцмана–Вольтерры

(1)-(3) в матричном виде с учетом реологического поведения древесины в процессе сушки:

$$\{\sigma\}=[D]\{\varepsilon_0\}-[D]\{\varepsilon\}-[D_1]\{\varepsilon_{01}\}+[D_1]\{\varepsilon_1\}-[D_2]\{\varepsilon_{02}\}+[D_2]\{\varepsilon_2\}\,, \quad (7)$$

где

$$[D]=\begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & 0 \\ C_{2211} & C_{2222} & 0 \\ 0 & 0 & 2C_{1212} \end{bmatrix}; \quad [D_1]=\begin{bmatrix} C_{1111} & 0 & 0 \\ 0 & C_{2222} & 0 \\ 0 & 0 & 2C_{1212} \end{bmatrix};$$

$$[D_2]=\begin{bmatrix} 0 & C_{1122} & 0 \\ C_{2211} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \qquad \{\varepsilon_0\}=\begin{Bmatrix} \varepsilon_{0_{11}} \\ \varepsilon_{0_{22}} \\ \varepsilon_{0_{12}} \end{Bmatrix}; \ \{\varepsilon\}=\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix};$$

$$\{\varepsilon_{01}\}=\begin{Bmatrix} \int_0^t R_{1111}(t-\tau)\varepsilon_{0_{11}}(\tau)d\tau \\ \int_0^t R_{2222}(t-\tau)\varepsilon_{0_{22}}(\tau)d\tau \\ \int_0^t R_{1212}(t-\tau)\varepsilon_{0_{12}}(\tau)d\tau \end{Bmatrix}; \quad \{\varepsilon_{02}\}=\begin{Bmatrix} \int_0^t R_{2211}(t-\tau)\varepsilon_{0_{11}}(\tau)d\tau \\ \int_0^t R_{1122}(t-\tau)\varepsilon_{0_{22}}(\tau)d\tau \\ 0 \end{Bmatrix};$$

$$\{\varepsilon_1\}=\begin{Bmatrix} \int_0^t R_{1111}(t-\tau)\varepsilon_{11}(\tau)d\tau \\ \int_0^t R_{2222}(t-\tau)\varepsilon_{22}(\tau)d\tau \\ \int_0^t R_{1212}(t-\tau)\varepsilon_{12}(\tau)d\tau \end{Bmatrix}; \quad \{\varepsilon_2\}=\begin{Bmatrix} \int_0^t R_{2211}(t-\tau)\varepsilon_{11}(\tau)d\tau \\ \int_0^t R_{1122}(t-\tau)\varepsilon_{22}(\tau)d\tau \\ 0 \end{Bmatrix}.$$

Для определения критериев выбора ядра релаксации $R(t-\tau)$ необходимо исходить из специфических особенностей реологического поведения древесины под действием постоянной механической нагрузки в разных стационарных температурно-влажностных условиях. Исходя из исследований [8, 9, 18], выбираем ядро реологического поведения древесины:

$$R(t-\tau)=\aleph e^{-\mu(t-\tau)},$$

где $\aleph$, μ – реологические параметры ядра, которые определяют экспериментально [10, 18] по методике [14].

Для определения остаточной деформации ядро $R(t-\tau)$ может быть представлено в виде $R(t-\tau)=\varphi_{\square}(t)\square\varphi_2(\tau)$ при $\lim\limits_{t\to\infty}\varphi_1(t)\neq 0$.

Запишем ядро $R(t)$ через узловые значения по времени t_j, применив метод квадратур [1]:

$$\int_0^t R(t-\tau)\varepsilon_0(\tau)d\tau=\int_0^{t_i}\aleph \mathrm{e}^{-\mu(t_i-\tau)}\varepsilon_0(\tau)d\tau=\mathrm{e}^{-\mu_i t_i}\sum_{j=1}^{i-1}A_j\aleph(t_j)\,\varepsilon_0(t_j)\mathrm{e}^{\mu_j t_j}\,,$$

где A_j – коэффициенты в узлах j, A_j = 1,0 – для постоянного шага интегрирования при $1 < j < i$, A_j = 0,5 – в остальных случаях.

Полная потенциальная энергия, согласно концепции МКЭ,

$$\Pi = \sum_{e=1}^{E} \Lambda^{(e)}\ , \tag{8}$$

где E – общее количество элементов;

$\Lambda^{(e)}$ – энергия деформации e-го элемента, которую определяют с учетом (4), (5) и (7).

Для того, чтобы минимизировать величину Π, продифференцируем выражение (8) по $\{L\}$, приравняем к нулю и запишем в векторно-матричной форме:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{L\}} = \sum_{e=1}^{E} \left[k^{(e)}\right] \{L\} + \left\{f^{(e)}\right\} = 0\,,$$

где

$$\left[k^{(e)}\right] = \int_{V^{(e)}} \left[B^{(e)}\right]^{\mathrm{T}} \left[D^{(e)}\right] \left[B^{(e)}\right] dV\,; \tag{9}$$

$$\left\{f^{(e)}\right\} = -\int_{V^{(e)}} \left[B^{(e)}\right]^{\mathrm{T}} \left[D^{(e)}\right] \left\{\varepsilon_0^{(e)}\right\} dV + \int_{V^{(e)}} \frac{1}{2} \left[B^{(e)}\right]^{\mathrm{T}} \left[D_1^{(e)}\right] \left\{\varepsilon_{01}^{(e)}\right\} dV -$$
$$- \int_{V^{(e)}} \frac{1}{2} \left[B^{(e)}\right]^{\mathrm{T}} \left[D_1^{(e)}\right] \left\{\varepsilon_1^{(e)}\right\} dV + \int_{V^{(e)}} \frac{1}{2} \left[B^{(e)}\right]^{\mathrm{T}} \left[D_2^{(e)}\right] \left\{\varepsilon_{02}^{(e)}\right\} dV -$$
$$- \int_{V^{(e)}} \frac{1}{2} \left[B^{(e)}\right]^{\mathrm{T}} \left[D_2^{(e)}\right] \left\{\varepsilon_2^{(e)}\right\} dV; \tag{10}$$

$$[B] = \frac{1}{2S} \begin{bmatrix} b_i & 0 & b_j & 0 & b_k & 0 \\ 0 & c_i & 0 & c_j & 0 & c_k \\ \frac{c_i}{2} & \frac{b_i}{2} & \frac{c_j}{2} & \frac{b_j}{2} & \frac{c_k}{2} & \frac{b_k}{2} \end{bmatrix}; \quad \begin{cases} b_i = (y_j - y_k) \\ c_i = (x_k - x_j) \end{cases}; \begin{cases} b_j = (y_k - y_i) \\ c_j = (x_i - x_k) \end{cases};$$

$$\begin{cases} b_k = (y_i - y_j) \\ c_k = (x_j - x_i) \end{cases};$$

S – площадь конечного e-го элемента;

(x_i, y_i), (x_j, y_j), (x_k, y_k) – соответственно координаты узлов i, j, k, в данном случае, треугольного симплекс-элемента.

Для определения матриц деформаций в (10) необходимо знать распределение влаги в каждой точке сечения. Таким образом, перед тем, как рассчитывать поле перемещений, необходимо решить дифференциальное уравнение (6) в частичных производных с системой граничных и начальных условий.

С вариационной точки зрения, решение (6) эквивалентно нахождению минимума функционала

$$\chi = \int_V \frac{1}{2}\left[\alpha_x\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2 + \alpha_y\left(\frac{\partial U}{\partial y}\right)^2 + 2\frac{\partial U}{\partial \tau}U\right]dV + \int_{S_2}\frac{\beta}{2}\left(U - U_R\right)^2\, dS\ .$$

Продифференцировав слагаемые функционала для каждого элемента при узловых значениях влагосодержания и приравняв результат к нулю, получим линейное дифференциальное уравнение первого порядка для определения {U}:

$$\frac{\partial\chi^{(e)}}{\partial\{U\}} = \left[k^{(e)}\right]\{U\} + \left[c^{(e)}\right]\frac{\partial\{U\}}{\partial\tau} + \left\{f^{(e)}\right\} = 0\,, \qquad (11)$$

где

$$\left[k^{(e)}\right] = \int_{V^{(e)}}\left[B_U{}^{(e)}\right]^{\mathrm{T}}\left[D^{(e)}\right]\left[B_U{}^{(e)}\right]dV + \int_{S_2^{(e)}}\beta\left[N^{(e)}\right]^{\mathrm{T}}\left[N^{(e)}\right]dS\,; \qquad (12)$$

$$\left[c^{(e)}\right] = \int_V [N]^{\mathrm{T}}[N]\,dV\,;\ \left\{f^{(e)}\right\} = -\int_{S_2^{(e)}}\beta U_R\left[N^{(e)}\right]^{\mathrm{T}}dS\,;\ \left[B_U\right] = \frac{1}{2S}\begin{bmatrix} b_i & b_j & b_k \\ c_i & c_j & c_k \end{bmatrix}. \qquad (13)$$

Матрицы [*K*], [*C*] и {*F*}, элементы которых описаны соотношениями (12), (13), определяют матрицы влагопроводности, демпфирования и нагрузки. Все интегралы в формулах (12), (13) взяты по отдельным элементам, а суммирование их вкладов проведено методом прямой жесткости [12].

В конечном итоге, для решения дифференциального уравнения (11) получена система уравнений:

$$[A]\{U\}_{\text{нов}} = [P]\{U\}_{\text{стар}} - \{F\};\ A = [K] + \frac{2}{\Delta\tau}[C];\ P = \frac{2}{\Delta\tau}[C].$$

Матрица [*A*] есть комбинация матриц [*C*] и [*K*], она зависит от шага во времени $\Delta\tau$. Если $\Delta\tau$ не изменяется и теплофизические параметры древесины не зависят от {*U*}, тогда значения элементов матрицы [*A*] во все моменты времени постоянны. Если $\Delta\tau$ или параметры материала изменяются в процессе решения, тогда матрицу [*A*] необходимо каждый раз вычислять заново. Эта процедура значительно увеличивает объем вычислений, но она необходима при переменном $\Delta\tau$ или в случае, когда α_x, α_y и другие свойства древесины являются функциями влажности.

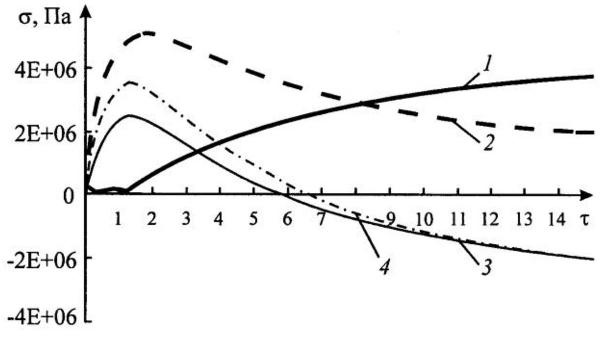

Рис. 2. Изменение напряжений σ_{xx} для разных точек сечения ($y = b/2$): *1* – $x = a/8$; 2 – $x = a/4$; 3 – $x = 3a/8$; 4 – $x = a/2$

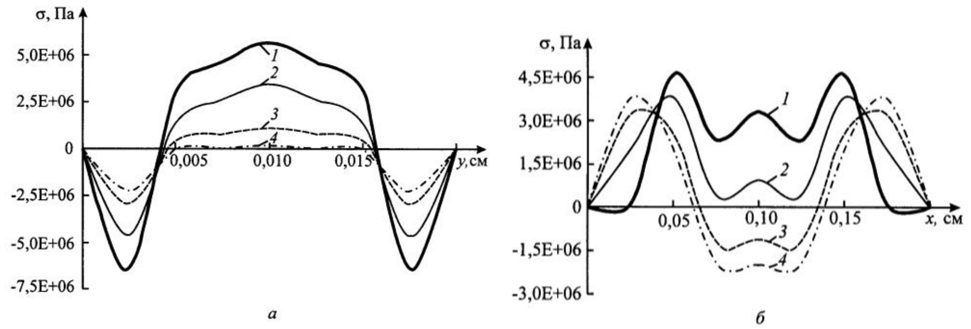

Рис. 3. Распределение напряжений σ_{yy} вдоль толщины при $x = a/2$ (*а*) и напряжений σ_{xx} вдоль ширины при $y = b/2$ (*б*) для различных моментов времени сушки: *1* – 1 ч; *2* – 5; *3* – 10; *4* – 15 ч

Результаты исследований. Расчеты для тангенциальных сосновых досок размером сечения $a \times b = 20 \times 2$ см, $E_1 = 670$ МПа, $E_2 = 550$ МПа, $\mu = 484$ МПа, $\nu = 0{,}38$, $\beta_x = \beta_y = 0{,}0023$, высушиваемых в условиях постоянного технологического режима (температура агента сушки $t_c = 88$ °С; относительная влажность $\varphi = 30$ %; коэффициенты: влагопроводности $\alpha_x = 1{,}8 \cdot 10^{-9}$ м/с, $\alpha_y = 2{,}25 \cdot 10^{-9}$ м/с, влагообмена $b_x = b_y = 3{,}5 \cdot 10^{-6}$ м^2/с), проведены в течение 15 ч с постоянным шагом $\Delta t = 3$ мин.

Численный алгоритм реализован с применением объектно-ориентированного программирования. На основании проведенного численного эксперимента исследовано влияние гигроскопической влажности, анизотропии теплофизических свойств и геометрических размеров пиломатериалов на распределение плоского напряженно-деформационного состояния древесины. На рис. 2, 3 приведены графические зависимости изменения нормальных напряжений σ_x и σ_y от времени в разных точках пиломатериалов.

Таким образом, полученные результаты позволяют судить о достаточно сложном характере изменения напряжений в высушиваемой древесине с учетом ее реологических свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Верлань, А.Ф.* Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы [Текст] / А.Ф. Верлань, В.С. Сизиков. – К.: Наук. думка, 1986. – 544 с.

2. *Зенкевич, О.* Конечные элементы и аппроксимация: пер. с англ. [Текст] / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1986. – 318 с.

3. *Кристинсен, Р.* Введение в теорию вязкоупругости [Текст] / Р. Кристинсен. – М.: Мир, 1974. – 268 с.

4. *Лапшин, Ю.Г.* Некоторые задачи деформирования материалов при переменной температуре и влажности [Текст] / Ю.Г. Лапшин // Лесн. журн. – 1970. – № 1. – С. 156–159. – (Изв. высш. учеб. заведений).

5. *Сегерлинд, Л.* Применение метода конечных элементов [Текст] / Л. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 394 с.

6. *Серговский, П.С.* О методе расчета внутренних напряжений при сушке [Текст] / П.С. Серговский, Б.Н. Уголев, Н.В. Скуратов // Науч. тр. / МЛТИ. – 1981. – Вып. 117.

7. *Соколовский, Я.И.* Взаимосвязь деформационно-релаксационных и тепломасообменных процессов при сушке капиллярно-пористых тел [Текст] / Я.И. Соколовский // Прикладная механика. – 1998. – 34, № 9. – С. 101–107.

8. *Соколовский, Я.И.* Идентификация и способ контроля напряженно-деформируемого состояния древесины в процессе сушки [Текст] / Я.И. Соколовский, Б.П. Поберейко // Структура, свойства и качество древесины – 2000: тр. 3-го Междунар. симп. – Петрозаводск, 2000. – С. 284–287.

9. *Соколовский, Я.И.* Расчет нестационарных напряжений в древесине при воздействии влаги [Текст] / Я.И. Соколовский, Б.П. Поберейко // Лесн. журн. – 2000. – № 1. – С. 99–105. – (Изв. высш. учеб. заведений).

10. *Уголев, Б.Н.* Деформативность древесины и напряжения при сушке [Текст] / Б.Н. Уголев. – М.: Лесн. пром-сть, 1971. – 174 с.

11. *Уголев, Б.Н.* История и перспективы развития исследований сушильных напряжений в древесине [Текст] / Б.Н. Уголев // Структура, свойства и качество древесины – 96: тр. 2-го Междунар. симп.– Москва–Мытищи, 1996. – С. 230–238.

12. *Уголев, Б.Н.* Контроль напряжений при сушке древесины [Текст] / Б.Н. Уголев, Ю.Г. Лапшин, Е.В. Кротов. – М.: Лесн. пром-сть, 1980. – 208 с.

13. *Шубин, Г.С.* Сушка и тепловая обработка древесины [Текст] / Г.С. Шубин. – М.: Лесн. пром-сть, 1990. – 236 с.

14. *Поберейко, Б.П.* Методика визначення параметрів кривих повзучості деревині [Текст] / Б.П. Поберейко // Наук. вісник / УкрДЛТУ. – 1998. – Вип. 8.1. – С. 232–236.

15. *Соколовський, Я.І.* Дослідження плоского напружено-деформативного стану деревині в процесі сушіння [Текст] / Я.І. Соколовський // Наук. вісник / УкрДЛТУ. – 1997. – Вип. 8. – С. 161–168.

16. *Соколовський, Я.І.* Застосування методу кінцевих елементів для розрахунку нестаціонарних полів вологоперенесення у висушуваній деревині [Текст] / Я.І. Соколовський, М.В. Дендюк, Б.П. Поберейко // Лісове госп-во, лісова, паперова і д/о промисловість: зб. наук.-техн. праць. – Львів: УкрДЛТУ, 2003. – Вип. 28. – С. 100–106.

17. *Соколовський, Я.І.* Напруження і деформації у деревині в процесі сушіння [Текст] / Я.І. Соколовський // Наук. вісник / УкрДЛТУ. – 2002. – Вип. 12.5. – С. 92–102.

18. *Соколовський, Я.І.* Результати експериментальних досліджень оберненої повзучості та складових деформацій деревині впоперек волокон [Текст] / Я.І. Соколовський, М.В. Дендюк // Лісове госп-во, лісова, паперова і д/о пром-сть. – 2002. – Вип. 27. – С. 73–77.

19. *Соколовський, Я.І.* Розрахунок анізотропних нестаціонарних температурно-вологісних полів у висушуваній деревині методом скінчених елементів [Текст] / Я.І. Соколовський, А.В. Бакалець // Лісове госп-во, лісова, паперова і д/о пром-сть: зб. наук.-техн. праць. – Львів: УкрДЛТУ, 2004. – Вип. 29. – С. 109–117.

20. *Ranta-Maunus, A.* Impact of mechanosorption creep to the long-term strength of timber [Текст] / A. Ranta-Maunus // Holz als Roh-und Werkstoff. – 1990. – N 48. – P. 67–71.

21. *Ranta-Maunus, A.* Rheological behaviour of wood in directions perpendicular to the grain [Текст] / A. Ranta-Maunus // Materials and structures. – 1993. – N 26. – P. 362–369.

22. *Sigurdur, O.* Two-dimensional simulation of wood deformation during graying [Текст] / O. Sigurdur, D. Ola. – Report TVSM-7086. – Sweden: Lund University of technology, 1994. – 34 p.

Украинский государственный
лесотехнический университет

Поступила 8.12.04

Ya.I. Sokolovsky, M.V. Dendyuk, B.P. Poberejko

Simulation of Deformational-and-relaxation Processes in Wood Drying

The mathematical model is proposed for determining the deformation state of wood in drying taking into account its viscoelasticity and anisotropy.