

УДК 674.047 М.В. Дендюк, асист.; доц. Б.П. Поберейко, канд. техн. наук;
проф. Я.І. Соколовський, д-р техн. наук – УкрДЛТУ

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМІВНОГО СТАНУ ТА ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОЇ УСАДКИ У ПЕРІОД РЕГУЛЯРНОГО РЕЖИМУ СУШІННЯ ПИЛОМАТЕРІАЛІВ

Наведені результати чисельного експерименту динаміки розподілу напружено-деформівного стану і диференціальної усадки пиломатеріалів у процесі сушіння залежно від геометричних розмірів та анізотропії фізико-механічних властивостей деревини.

M.V. Dendjuk, Doc. B.P. Poberejko, Prof. Ya.I. Sokolovskiy – USUFWT

Analyse of stressed – strained state and differential shrinkage for period regular regime of drying lumber

Obtained results of numerical experiment of dynamics of distribution of stress-strained state and differential shrinkage of lumber in drying process dependent on geometrical size and anisotropy of physical-mechanical properties of wood.

Актуальність. Однією з умов успішного проведення процесу сушіння деревини є вдосконалення відомих та розробка нових методів чи способів вимірювань і контролю напружень на поверхні та всередині матеріалу. Для вирішення таких задач наукову цінність мають дослідження, присвячені встановленню та обґрунтуванню залежностей напружено-деформівного стану (НДС) від інформативних характеристик висушуваних пиломатеріалів. Наочним підтвердженням цього є метод диференціальної усадки (ДУ), величина якої залежить від НДС для капілярно-пористих ізотропних матеріалів [1, 2]. Однак, деревина належить до анізотропних тіл, тому актуальними є задачі, які визначають та аналізують вплив анізотропії фізико-механічних характеристик на зв'язок ДУ з НДС для пиломатеріалів у різних температурно-вологісних умовах.

Метод розв'язання. У роботі [3] встановлені залежності ДУ з НДС пиломатеріалів у процесі сушіння з врахуванням анізотропії фізико-механічних властивостей, які описуються рівняннями:

$$\begin{aligned}\sigma_x(x, y) &= \frac{(x^2 - S/\gamma)^2}{\Delta} \left\{ (12y^2 - 4S\gamma) \cdot \Delta_1 + x^2 (12y^2 - 4S\gamma) \cdot \Delta_2 + \right. \\ &\quad \left. + (30y^4 - 24S\gamma y^2 + 2S^2\gamma^2) \cdot \Delta_3 \right\} \cdot \exp(-\mu_1^2 Fo); \\ \sigma_y(x, y) &= \frac{(y^2 - S\gamma)^2}{\Delta} \cdot \left\{ \left(12x^2 - 4\frac{S}{\gamma} \right) \Delta_1 + y^2 \left(12x^2 - 4\frac{S}{\gamma} \right) \Delta_3 + \right. \\ &\quad \left. + \left(30x^4 - 24\left(\frac{S}{\gamma}\right)x^2 + 2\left(\frac{S}{\gamma}\right)^2 \right) \Delta_2 \right\} \cdot \exp(-\mu_1^2 Fo) \\ \tau_{xy}(x, y) &= -\frac{8xy}{\Delta} \cdot \left\{ 2\left(x^2 - \left(y^2 - S\gamma\right)\Delta_1 + \left(y^2 - S\gamma\right)\left[3x^4 - 4\left(\frac{S}{\gamma}\right)x^2 + \left(\frac{S}{\gamma}\right)^2 \right] \right) \cdot \Delta_2 + \right.\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{aligned}&+ \left(x^2 - \frac{S}{\gamma} \right) \left[3y^4 - 4S\gamma y^2 + (S\gamma)^2 \right] \cdot \Delta_3 \Big\} \cdot \exp(-\mu_1^2 Fo); \\ \Delta U &= \left[\frac{8S^3\gamma\sqrt{S\gamma}}{15E_2\Delta} \left\{ -2 \left[1 + \left(\frac{2S}{\gamma} \right)^2 \right] \Delta_1 + \left[1 - \frac{8S}{\gamma} \right] \frac{S}{\gamma} \Delta_2 - \frac{2}{7} (S\gamma) \left[1 + \left(\frac{2S}{\gamma} \right)^2 \right] \Delta_3 \right\} + \right. \\ &\quad \left. + \beta_y (1 - \cos \mu_1) W \cdot \sqrt{S\gamma} \right] \cdot \exp(-\mu_1^2 Fo),\end{aligned}$$

де σ_x і σ_y – компоненти нормальних напружень, спрямованих, відповідно, вздовж товщини $2R$ і вздовж ширини $2a$ поперечного січення тангентальної дошки у Декартові системі координат, початок якої знаходиться у центрі січення; S – чверть площі поперечного січення дошки; γ – відношення ширини до товщини дошки; $F_0 = a_m \tau / R^2$ – критерій Фур'є; R – півтовщини дошки; a_m – коефіцієнт волого провідності деревини; τ – час сушіння; β_y – коефіцієнт лінійного висихання деревини у тангенціальному напрямі; μ_1 – коефіцієнт, який визначається із характеристичного рівняння $\text{ctg} \mu_1 = \mu_1 / B_1$; $B_1 = \alpha R / a_m$ – критерій Біо; α – коефіцієнт вологообміну.

У формулах (1) прийнято такі позначення:

$$\begin{aligned}\Delta &= \begin{vmatrix} A_{11} & A_{21} & A_{31} \\ A_{21} & A_{22} & A_{32} \\ A_{31} & A_{23} & A_{33} \end{vmatrix}; & \Delta_1 &= \begin{vmatrix} B_1 & A_{21} & A_{31} \\ B_2 & A_{22} & A_{32} \\ B_3 & A_{23} & A_{33} \end{vmatrix}; \\ \Delta_2 &= \begin{vmatrix} A_{11} & B_1 & A_{31} \\ A_{21} & B_2 & A_{32} \\ A_{31} & B_3 & A_{33} \end{vmatrix}; & \Delta_3 &= \begin{vmatrix} A_{11} & A_{21} & B_1 \\ A_{21} & A_{22} & B_2 \\ A_{31} & A_{23} & B_3 \end{vmatrix}; \\ A_{11} &= 20.81 \cdot S^7 \left\{ \frac{1}{E_2} \gamma^2 + \frac{2}{7} \left[\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{21}}{E_2} \right] + \frac{1}{E_1 \gamma^2} \right\}; \\ A_{12} = A_{21} &= 20.81 \cdot \frac{S^8}{\gamma} \left\{ \frac{\gamma^2}{7 \cdot E_2} + \frac{1}{11 \cdot E_1 \gamma^2} \right\}; & A_{13} = A_{31} &= 20.81 \cdot \frac{S^8}{\gamma} \left\{ \frac{\gamma^4}{165 \cdot E_2} + \frac{1}{7E_1} \right\}; \\ A_{22} &= 145.64 \cdot \frac{S^9}{\gamma^2} \left\{ \frac{3\gamma^2}{49 \cdot E_2} + 2 \left[\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{21}}{E_2} \right] + \frac{3}{101 \cdot E_1 \gamma^2} \right\}; \\ A_{23} = A_{32} &= 0.27 \cdot \frac{S^9}{\gamma^2} \left\{ \frac{\gamma^4}{E_2} + \frac{1}{E_1} \right\}; & A_{31} = A_{13} &= 20.81 \cdot S^8 \gamma^3 \left\{ \frac{1}{11 \cdot E_2} + \frac{\gamma^4}{7E_1} \right\}; \\ A_{33} &= 20.81 \cdot S^9 \left\{ \frac{3\gamma^4}{143E_2} + \frac{2}{77} \left[\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{21}}{E_2} \right] \gamma^2 + \frac{2}{7E_1} \right\};\end{aligned}$$

$$B_1 = 8.53 \cdot \mu_1 \beta_y W^* \cdot S^4 \gamma \left\{ -3 - \frac{6}{\mu_1^2 Bi} + \frac{1}{\mu_1^2} + \frac{6}{\mu_1^4} \right\};$$

$$B_2 = 256 \beta_y W^* S^5 \frac{\sin(\mu_1)}{\mu_1} \left\{ \frac{90}{\mu_1^2 Bi} - \frac{9}{Bi} + \frac{39}{\mu_1^2} - \frac{90}{\mu_1^4} - 1 \right\};$$

$$B_3 = 256 \beta_y W^* S^5 \gamma^2 \frac{\sin(\mu_1)}{105 \mu_1} \left\{ \frac{3}{\mu_1^2} - \frac{3}{Bi} - 1 \right\};$$

$$W^* = \frac{2 B_1 \sqrt{B_1 + \mu_1^2}}{\mu_1 (B_1^2 + B_1 + \mu_1^2)} \left([W_{II} - W_p] - 2 \Delta W \left[\frac{1}{Bi} - \frac{1}{\mu_1^2} \right] \right),$$

де W_p – рівноважна вологість; $\Delta W, W_{II}$ – перепад води та вологість поверхні матеріалу на початку регулярного режиму; E_1, E_2, ν_{21} – відповідно модулі пружності та коефіцієнт Пуассона для деревини як ортотропного тіла; G_{12} – модуль зсуву.

Наведена система рівнянь (1) описує закономірності взаємозв'язку ДУ і плоского НДС у пиломатеріалах на етапі регулярного режиму зміни вологості в їх об'ємі. Окрім цього, вона враховує анізотропію пружних характеристик деревини і тому є вихідною для проведення чисельних експериментів необхідних для вироблення рекомендацій з вдосконалення відомого методу контролю НДС за диференціальною усадкою [1].

Аналіз та обговорення результатів чисельних експериментів. Результати розрахунків для тангентальних соснових дощок ($E_1 = 670$ МПа, $E_2 = 550$ МПа, $G_{12} = 242$ МПа, $\nu_{21} = 0,38$, $\beta_y = 0,0068$), висушуваних в умовах сталого технологічного режиму (температура агента сушіння $t_c = 88^\circ\text{C}$; психометрична різниця температур $\Delta t = 14^\circ\text{C}$; відносна вологість $\phi = 55\%$; швидкість руху агента сушіння $v = 2$ м/с), наведено на рис. 1 – 11. Графічні залежності нормальних тангенціальних напружень відповідають різним значенням критерію Фур'є. Зокрема, $F_0 = 0,4$; $F_0 = 0,6$; $F_0 = 0,8$; $F_0 = 1,0$. З їх аналізу витікає, що із зростанням часу сушіння τ значення всіх компонентів напружень зменшуються до нуля. Такий характер поведінки НДС обґрунтовується спадом перепаду води за товщиною матеріалу у період регулярного режиму протікання процесу.

Кількість характерних точок, в яких компоненти напружень змінюють знаки, наприклад, А, В, С і D (рис. 2), та їх координати є залежними від геометричних розмірів пиломатеріалів і визначаються рівняннями:

$$\sigma_x(x, y)|_{x=\text{const}} = 0; \sigma_y(x, y)|_{y=\text{const}} = 0; \tau_x(x, y)|_{x=\text{const}} = 0. \quad (2)$$

Їх наявність дозволяє розробити поперечне січення матеріалу на окремі області такі, щоб у будь-якій з них не спостерігалась зміна знаку для певної компоненти напружень.

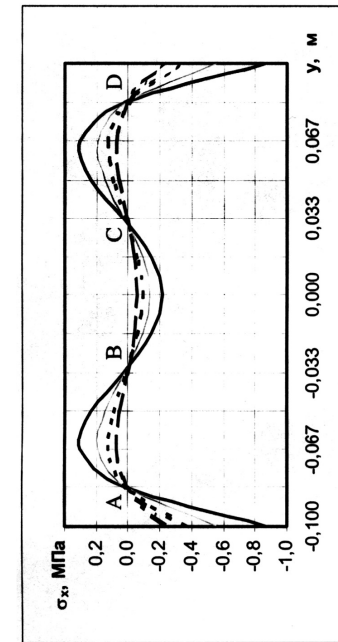


Рис. 2. Зміна нормальних напружень σ_x залежно від координати Y ($-0,1 \leq y \leq 0,1$, $x=R/2$)

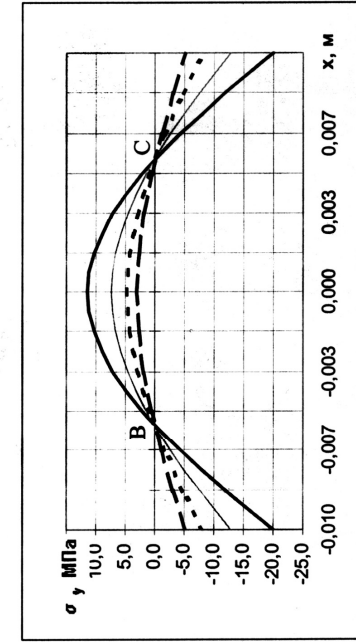


Рис. 4. Зміна нормальних напружень σ_y залежно від координати X ($-0,01 \leq x \leq 0,01$, $y=a/2$)

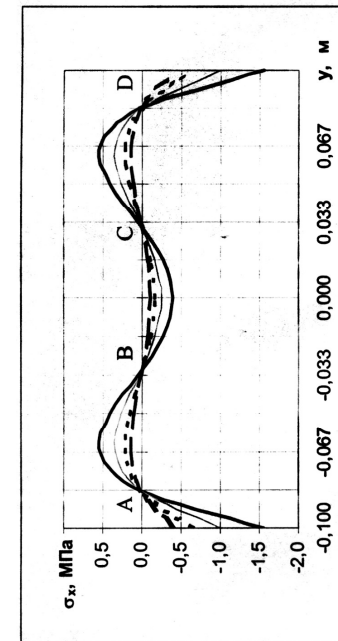


Рис. 1. Зміна нормальних напружень σ_x залежно від координати Y ($-0,1 \leq y \leq 0,1$, $x=0$)

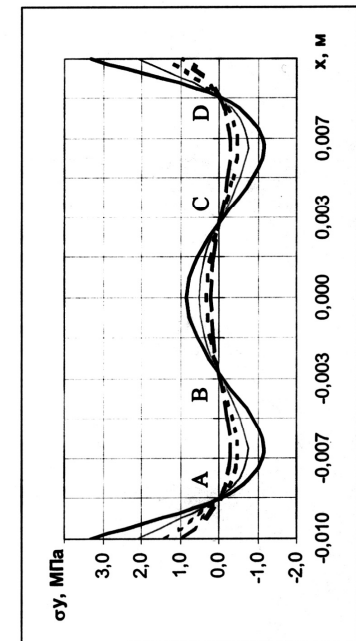


Рис. 3. Зміна нормальних напружень σ_y залежно від координати X ($-0,01 \leq x \leq 0,01$, $y=0$)

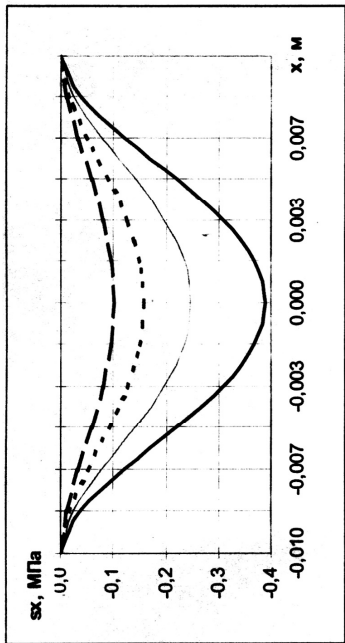


Рис. 5. Зміна нормальних напружень σ_x залежно від координати X ($-0,01 \leq x \leq 0,01$, $y=a$)

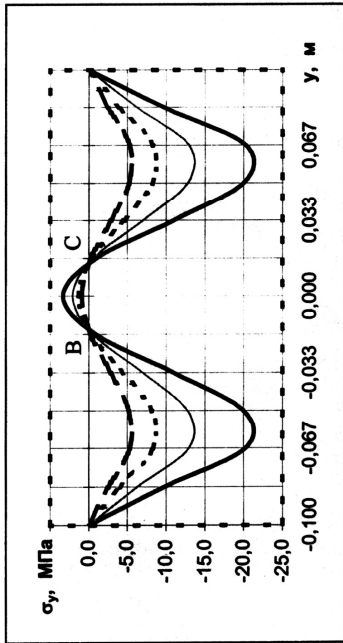


Рис. 7. Зміна нормальних напружень σ_y залежно від координати Y ($-0,1 \leq y \leq 0,1$, $x=R$)

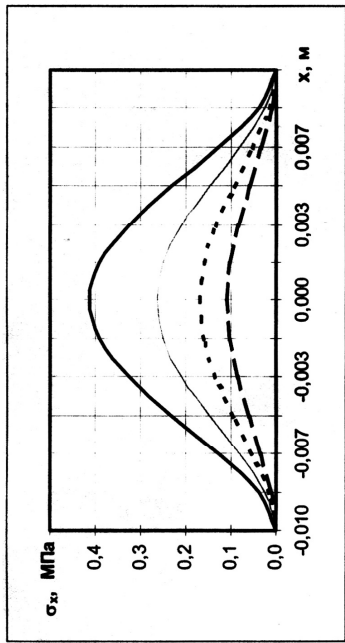


Рис. 6. Зміна нормальних напружень σ_x залежно від координати X ($-0,01 \leq x \leq 0,01$, $y=0$)

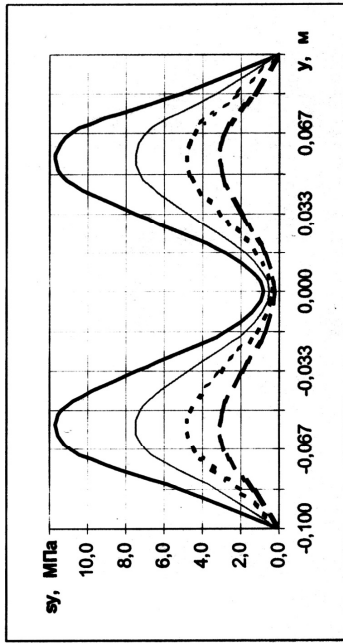


Рис. 8. Зміна нормальних напружень σ_y залежно від координати Y ($-0,1 \leq y \leq 0,1$, $x=0$)

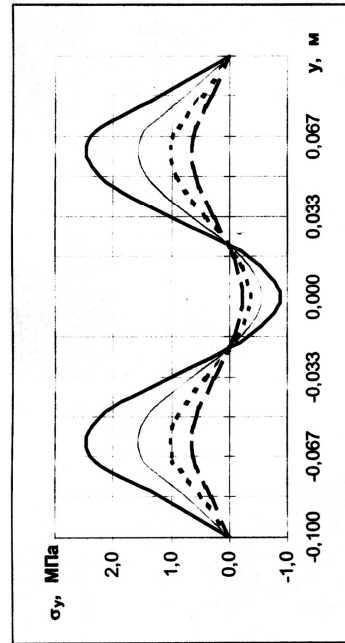


Рис. 9. Зміна нормальних напружень σ_y залежно від координати Y ($-0,1 \leq y \leq 0,1$, $x=R/2$)

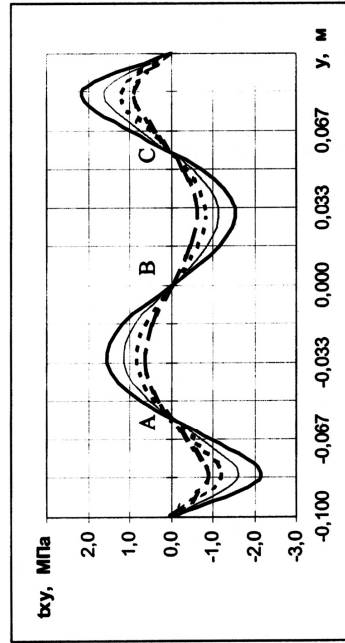


Рис. 11. Зміна тангенціальних напружень τ_{xy} залежно від координати Y ($-0,1 \leq y \leq 0,1$, $x=R/2$)

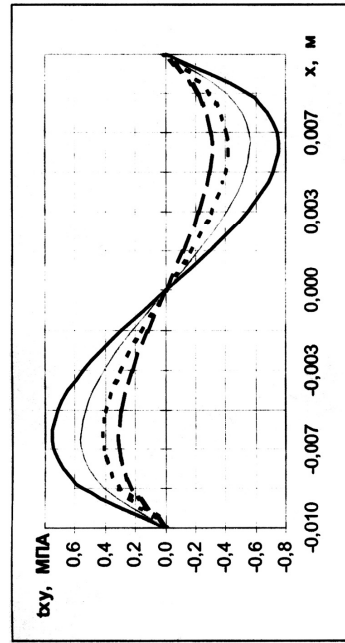


Рис. 10. Зміна тангенціальних напружень τ_{xy} залежно від координати X ($-0,01 \leq x \leq 0,01$, $y=a/2$)

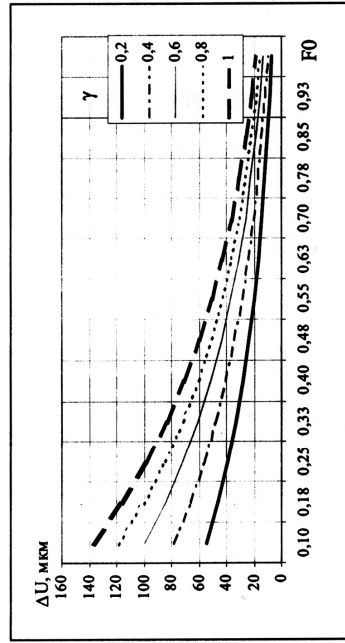


Рис. 12. Зміна дифузії залежно від критерію Фур'є і величини γ

Для $\sigma_x(x, y)$ таке розбиття наведено на рис. 13, де заштриховані ділянки – це області в яких $\sigma_x(x, y)$ за характером дії є стискаючими, а в не заштригованих – стискаючими. Співвідношення їх розмірів є залежним від багатьох факторів, зокрема, від геометричних розмірів дошки, параметрів агента сушіння, фізико-механічних характеристик деревини тощо.

Однак, у загальному випадку, воно повинно задовольняти умову симетрії розподілу вологи $W(x, y)$ за товщиною дошки

$$W(x, y) = W(-x, y), \quad (3)$$

та умови рівноваги

$$\int_0^a \sigma_x(x, y, \tau) dy = 0; \quad (4)$$

$$\int_0^R \sigma_y(x, y, \tau) dy = 0; \quad (5)$$

$$\int_0^a \int_0^R \tau_{xy}(x, y, \tau) dx dy = -\frac{\Delta_1}{\Delta} S^4 \exp(-\mu_1^2 F_0). \quad (6)$$

Дійсно, із (4) – (5) витікає, що чим меншими є діапазони зміни додатних або від'ємних значень величин $\sigma_x(x, y)$, або $\sigma_y(x, y)$, тим більшими вони є за абсолютними значеннями. Підтвердженням отриманого висновку є порівняльний аналіз графіків на рис. 4, 5, згідно яких додатні значення $\sigma_x(x, a/2)$ в 1 ÷ 3,5 рази є більшими за від'ємні, а відповідні діапазони їх зміни відрізняються приблизно у 1,2 рази.

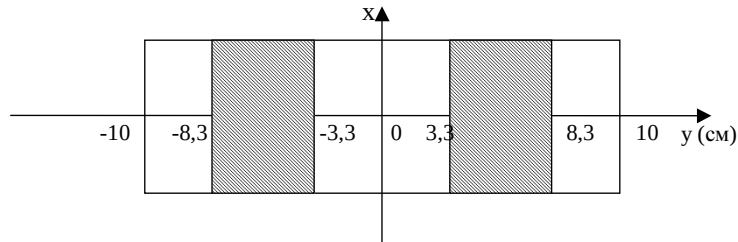


Рис. 13. Поперечний переріз соснової дошки шириною $2a = 20$ см і товщиною $2R = 20$ мм

Відповідно для проаналізованого НДС графічні залежності диференціальної усадки ΔU від зміни критерію Фур'є і відношення геометричних розмірів пиломатеріалів подані на рис. 12. Їх аналіз свідчить про те, що із збільшенням часу протікання процесу вологовидалення деревини величина ΔU зменшується від 150 мкм до нуля. Окрім цього, враховуючи аналогічний характер поведінки σ_x, σ_y і τ_{xy} у часі, зазначимо, що чим більших значень набуває ΔU , тим більшими є компоненти напружень.

Література

1. Уголев Б.Н., Лапшин Ю.Г., Кротов Е.В. Контроль напряжений при сушке древесины. – М.: Лесн. пром-сть, 1980. – 203 с.
2. Лапшин Ю.Г. Некоторые задачи деформирования материалов при переменной температуре и влажности // Изв. Вузов. Лесной журнал, 1970, №1. – С. 45-50.
3. Поберейко Б.П., Соколовський Я.І. Вплив анізотропії деревини на залежність диференціальної усадки з напружено-деформівним станом у висушуваних пиломатеріалах // Науковий вісник: Сучасні теоретичні розробки у деревообробному і меблевому виробництві. – Львів: УкрДЛТУ. – 2002, вип. 12.5. – С. 162-167.

УДК 066.47

Інж. Б.М. Микичак¹; д-р техн. наук, проф. Я.М. Ханик¹;
доц. В.М. Гербеї², канд. техн. наук;
доц. І.М. Ільків¹, канд. техн. наук; інж. В.М. Кузьма¹

ГІДРОДИНАМІКА І КІНЕТИКА ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ ШПОНУ ПРИ СТВОРЕННІ ПЕРЕПАДУ ТИСКІВ ЗА РАХУНОК РОЗРІДЖЕННЯ

Наведено результати дослідження гідродинаміки і кінетики сушіння шпону при створенні перепаду тисків за рахунок розрідження, а також отримано розрахункові залежності, які дозволяють прогнозувати процес сушіння і розрахувати основні параметри сушильних агрегатів.

Eng. B.M. Mykychak; prof. Ya.M. Hanyk – NU "Lvivs'ka Politehnika";
doc. V.M. Gerbey – USUFWT; doc. I.M. Ilkyv;
eng. V.M. Kyzma – NU "Lvivs'ka Politehnika"

Hydrodynamics and kinetic of filtration drying process of the wooden material

Results of investigation of hydrodynamics and kinetic of the wooden material's drying process are presented in this work.

Сушіння шпону є складною проблемою як з енергетичної так і з точки зору отримання висушеного матеріалу високої якості [1]. Існує ряд методів і сушильних агрегатів для зневоднення шпону [1]. Однак, вони характеризуються громіздкістю, великою металоємністю, і не дозволяють отримати висушений матеріал високої якості.

Одним з методів, який дозволяє усунути зазначені вище недоліки, являється метод фільтраційного сушіння [2], який полягає в тому, що теплоносій контактує з внутрішньою поверхнею шпону, внаслідок його проходження через пористу структуру матеріалу за рахунок створення перепаду тисків. Як доведено в ряді робіт, в яких наведені результати фільтраційного сушіння матеріалів різної структурної модифікації, швидкість процесу сушіння залежить від температури теплоносія, створеного перепаду тисків, товщини шпону, а ефективність процесу визначається затратами енергії для створення заданого гідродинамічного режиму і часом обезводнення до необхідної вологості.

¹ НУ "Львівська політехніка"

² УкрДЛТУ