

2. Полоз В.І., Шостак В.В. Обладнання для підготовки технологічної стружки як об'єкт надійності// Наук. вісник УкрДЛТУ: Зб. наук.-техн. праць. – Львів: УкрДЛТУ. – 2003, вип. 13.2 – С. 252-256.

3. Кокс Д., Смит В. Теория восстановления. – М.: Сов. радио, 1967. – 250 с.

УДК 674.047

*Проф. Я.І. Соколовський, д-р техн. наук;
ст. викл. О.М. Петрів – УкрДЛТУ*

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСЕННЯ У ПРОЦЕСІ ПРЕСУВАННЯ ДЕРЕВНОСТРУЖКОВИХ ПЛИТ

Наведено фізико-математичну модель розрахунку динаміки температурно-вологісних полів у процесі пресування деревностружкового пакету для змінної дії пресу. Здійснено чисельну реалізацію моделі та проаналізовано вплив основних технологічних факторів на динаміку температурно-вологісних полів, тиску парогазової суміші під час пресування.

Prof. Ya.I. Sokolowsky; senior teacher O.M. Petriv – USUFWT

Determining of technological factors influence on heat and mass transfer under pressing process of particle boards

The physical-mathematical model for calculation of the dynamics of thermal and moisture fields during pressing process of particle board is presented for variable action of presser. The numerical realisation of the model has been done and an influence of the main technological factors on dynamics of thermal and moisture fields and on pressure of gas-vapour mixture under pressing have been analysed.

Актуальність досліджень

Дефіцит енергоносіїв на Україні зумовлює вдосконалення технологічних процесів, зокрема в деревообробній галузі. Детальне дослідження та моделювання процесів тепломасоперенесення під час пресування деревностружкових плит (ДСП) дасть змогу виявити шляхи подальшої інтенсифікації та вдосконалити даний процес.

Аналіз відомих результатів

Проблемні виявлення впливу різних технологічних факторів, зокрема початкової вологості, густини, фракційного складу на процеси тепломасоперенесення під час пресування деревностружкових плит присвячено значну кількість наукових досліджень теоретичного та експериментального характеру [1-7, 9, 10]. Розроблено інженерні методи розрахунку та встановлені закономірності динаміки зміни температурно-вологісних полів, тиску парогазової суміші залежно від деяких технологічних факторів в основному у рамках одновимірної задачі. У [8] наведена просторова фізико-математична модель зміни нестационарних полів тепломасоперенесення, тиску парогазової суміші з врахуванням анізотропії теплофізичних властивостей матеріалу. Розроблений алгоритм, програмне забезпечення реалізації моделі дають змогу кількісно описати вплив основних технологічних факторів на величину і характер зміни нерівномірно розподілених гідробаротермічних полів в об'ємі дерев-

ностружкового пакету. Поряд з тим, математичне та програмне забезпечення є складовою частиною створення проблемно-орієнтованих інформаційних технологій проектування для підвищення ефективності технологічних процесів виготовлення деревних композиційних матеріалів. Саме така мета ставиться у даній роботі, яка є продовженням досліджень [8].

Постановка задачі та фізико-математична модель

Для визначення динаміки температурного $T(x, y, z, \tau)$ і вологісного $U(x, y, z, \tau)$ полів, тиску парогазової суміші $P(x, y, z, \tau)$, ступені твердіння клею $\Theta(x, y, z, \tau)$ у процесі пресування деревностружкового пакету, розглянемо його елементарний об'єм $V = \{0 \leq x \leq b, 0 \leq y \leq l, 0 \leq z \leq h\}$. На зовнішніх площинах, що паралельні площині пресування XOY , діє прес з температурою T_{np} і змінним зусиллям P_{np}

$$P_{np} = \begin{cases} 0,021294 e^{0,091691\tau}; & \tau < 60; \\ 2; & 60 \leq \tau \leq 120; \\ 21,289266 e^{-0,01809\tau}; & \tau > 120. \end{cases} \quad (1)$$

Вважаємо, що осі анізотропії пакету збігаються з геометричними осями координат (рис. 1). Зазначимо, що в [8] тиск пресування P_{np} вважався сталим.

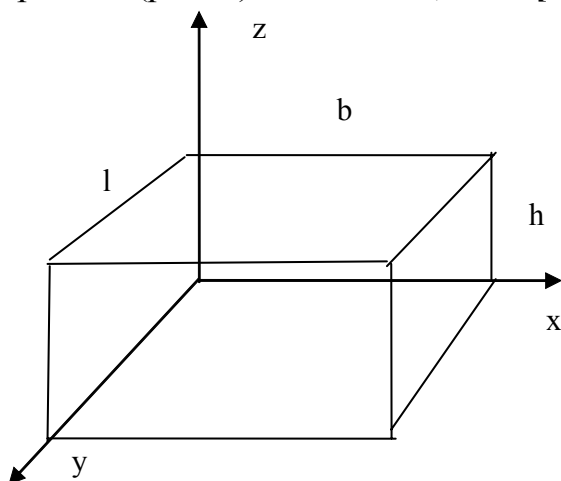


Рис. 1. Схематичне зображення деревностружкового пакету:
l – довжина, *b* – ширина,
h – товщина

На основі [8], фізико-математична модель може бути представлена наступними рівняннями. Рівняння нерозривності для парогазової суміші

$$\Pi \frac{\partial \rho_n}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial P(x, y, z, \tau)}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial P(x, y, z, \tau)}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial P(x, y, z, \tau)}{\partial z} \right) + \rho_s \frac{\partial u}{\partial \tau} = 0. \quad (2)$$

Рівняння перенесення теплової енергії теплопровідністю і конвективним шляхом із врахуванням фазових переходів і твердіння клею

$$\begin{aligned} c(u, T) \rho \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x(u, T) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y(u, T) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial y} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z(u, T) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial z} \right) + \sum_{i=1}^3 C_{n2} \left(k_{x_i} \frac{\partial P(x, y, z, \tau)}{\partial x_i} \right) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial x_i} + \\ & + \rho_s r \frac{\partial u(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} + r M \rho_{ск} (1 - \Pi) \frac{\partial \Theta(x, y, z, \tau)}{\partial \tau}. \end{aligned} \quad (3)$$

Рівняння для визначення вологовмісту із врахуванням змінної за часом границі фазових переходів, одночасного врахування фільтраційного і дифузійного перенесення

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{100}{\rho} \begin{cases} III_1(P_{nn} - P)^2; & P \geq P_{nn}; \\ -\beta_v(P_{nn} - P)\chi; & P_{nn} - P_c < P \leq P_{nn}; \\ -III_2((P_{nn} - P - P_c)^2 + \beta_v P_c)\chi; & P_{nn} \geq P_r + P, \end{cases} \quad (4)$$

де: $\chi = \arctan(U / III_\varepsilon)$; $\beta_v = 1,8 \cdot 10^{-4} \Lambda(T) \cdot (k_0 \mu / \rho)^{0,265} \mu^{0,49} (\partial P / \partial x)^{0,43}$;
 $\Lambda(T) = 21,9 \cdot 10^{-6} (T/273)^{1,5}$.

Рівняння твердіння клею

$$\frac{\partial \Theta(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \begin{cases} (1 - \Theta(x, y, z, \tau))f(T, C_c m); & \Theta < \Theta_{zc}; \\ (\Theta_k(T) - \Theta)f(T, C_c m); & \Theta_{zc} \leq \Theta \leq \Theta_k(T); \\ 0; & \Theta > \Theta_k(T), \end{cases} \quad (5)$$

де $f(T, C_c, m) = -\ln 0,4 / \tau_{zc}(T, C_c m)$ описує швидкість твердіння клею і визначається за допомогою величини часу досягнення гелеподібного стану.

Початкові умови для визначення $T(x, y, z, \tau)$, $U(x, y, z, \tau)$, $P(x, y, z, \tau)$ задаються рівномірно розподіленими величинами за товщиною пакету на початку пресування:

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z, 0); \quad (6)$$

$$U(x, y, z, 0) = U_0(x, y, z, 0); \quad (7)$$

$$\Theta(x, y, z, 0) = \Theta_0(x, y, z, 0). \quad (8)$$

Граничні умови теплообміну на площинах, паралельних до пресу матимуть наступний вигляд:

$$T(x, y, 0, \tau) = T_{np} - A_0 e^{-\kappa \sqrt{\tau}}; \quad (9)$$

$$T(x, y, h, \tau) = T_{np} - A_0 e^{-\kappa \sqrt{\tau}}. \quad (10)$$

Граничні умови теплообміну на бокових поверхнях характеризують теплообмін із середовищем:

$$\lambda_x \frac{\partial T(0, y, z, \tau)}{\partial x} + \alpha_x (T_c - T(0, y, z, \tau)) = 0; \quad (11)$$

$$\lambda_x \frac{\partial T(b, y, z, \tau)}{\partial x} + \alpha_x (T_c - T(b, y, z, \tau)) = 0; \quad (12)$$

$$\lambda_y \frac{\partial T(x, 0, z, \tau)}{\partial y} + \alpha_y (T_c - T(x, 0, z, \tau)) = 0; \quad (13)$$

$$\lambda_y \frac{\partial T(x, l, z, \tau)}{\partial y} + \alpha_y (T_c - T(x, l, z, \tau)) = 0. \quad (14)$$

Граничні умови масоперенесення на площинах, паралельних до пресу, визначаються гідродинамічними коефіцієнтами контактного шару між піддоном і деревностружковим пакетом:

$$-k'_p \frac{\partial P(x, y, 0, \tau)}{\partial z} + \beta'_p (P_a - P(x, y, 0, \tau)) = 0; \quad (15)$$

$$-k'_p \frac{\partial P(x, y, h, \tau)}{\partial z} + \beta'_p (P_a - P(x, y, h, \tau)) = 0. \quad (16)$$

Граничні умови масоперенесення на бокових поверхнях мають такий вигляд:

$$-k_p \frac{\partial P(0, y, z, \tau)}{\partial x} + \beta_p (P_a - P(0, y, z, \tau)) = 0; \quad (17)$$

$$-k_p \frac{\partial P(b, y, z, \tau)}{\partial x} + \beta_p (P_a - P(b, y, z, \tau)) = 0; \quad (18)$$

$$-k_p \frac{\partial P(x, 0, z, \tau)}{\partial y} + \beta_p (P_a - P(x, 0, z, \tau)) = 0; \quad (19)$$

$$-k_p \frac{\partial P(x, l, z, \tau)}{\partial y} + \beta_p (P_a - P(x, b, z, \tau)) = 0. \quad (20)$$

Для чисельної реалізації моделі (1)-(20) необхідно задати теплофізичні характеристики, які отримуються експериментальним шляхом. Деякі з них наведено в [3-7, 9, 10].

У даній фізико-математичній моделі введено наступні позначення: $c(u, t)$ – питома теплоємність пакету, Дж/кг·°С; c_{ng} – питома теплоємність парогазової суміші, Дж/кг·°С; $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ – коефіцієнт теплопровідності в напрямку осей, Вт/кг·°С; k_x, k_y, k_z – коефіцієнт фільтрації в напрямку осей; k_p – коефіцієнт фільтрації на бокових поверхнях; k'_p – коефіцієнт фільтрації на площинах пресування; ρ_s – густина води, кг/м³; ρ_n – густина пару, кг/м³; ρ – густина пакету, кг/м³; $\rho_{ск}$ – густина скелету, кг/м³; r – питома теплота фазового переходу, Дж/кг; відношення клею в абсолютно сухому стані до маси стружки; Π – пористість; T – температура, °С; P – тиск, МПа; W – вологість, %; U – вологовміст; Θ – твердіння клею; β_p – коефіцієнт масоперенесення на боковій площині, 1/м²; β'_p – коефіцієнт масоперенесення на площинах пресування, 1/м²; P_{nn} – тиск насиченої пари, МПа; P_{np} – тиск пресу (МПа); $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ – коефіцієнти теплообміну вздовж відповідних осей, Вт/м·°С; Θ_{zc} – ступінь отвердіння в'язучого до гелеподібного стану; τ_{zc} – час переходу до гелеподібного стану, с; Θ_k – максимальна ступінь твердіння клею; C_c – концентрація клею; m – кількість затверджувача, %; d – діаметр пори (м); T_{np} – температура пресу, °С; T_c – температура зовнішнього середовища, °С, μ – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²·с⁻¹; k_0 – коефіцієнт проникливості, м²; α, β – коефіцієнти опору в'язкості та інерції контактного шару; K_1, K_2 – коефіцієнти пропорційності; θ, ε – експе-

риментально визначені константи, що характеризують гідродинамічний опір матеріалу; R – універсальна газова стала, Дж/кг⁻¹·К⁻¹; r_{01} , r_{02} , r_{03} – відповідно максимальні розміри частинок, м; M – відношення клею в абсолютно сухому стані до маси абсолютно сухої стружки; III_1 , III_2 , III_ϵ – параметри функції штрафу; β_v – об'ємний коефіцієнт масообміну, віднесений до різниці масових концентрацій, с/м²; P_a – атмосферний тиск; A_0 , κ – константи для визначення температури пакету на площині пресування.

Чисельна реалізація фізико-математичної моделі

Для розрахунку тепломасообмінних полів у процесі пресування деревностружкових плит використано, розроблений авторами, алгоритм та програмну реалізацію даної моделі (1)-(4) з початковими умовами (6)-(8) та граничними умовами (9)-(20) на об'єктно-орієнтованій мові Visual Basic [8]. Вхідні дані є такими: $l=20$, мм; $b=20$, мм; $h=16$ мм, $T_c=20$, °C; $T_{np}=160$, °C; $A_0=28$, °C; $k=0,072$; $\rho=700$, кг/м³; $P_a=0,0165$ МПа; $C_c=0,54$; $P_0=0,0165$ МПа; $\Theta_{sc}=0,6$; $\Theta_k=0,9$; $\Theta_0=0,4$; $P_{np}=2,7$; $d=0,005$ м; $r_{01}=r_{02}=r_{03}=0,003$; $c_{ne}=2850$, Дж/кг·°C; $\rho_g=1$, кг/м³; $r=2250000$, Дж/кг; $\Pi=0,7$; $\mu=0,11$ Па·с; $\nu=0,02$, м²·с⁻¹; $k_0=0,098$ м²; $K_1=88$, $K_2=12,42$; $\epsilon=1,5$; $\theta=0,871$; $m=0,01$; $M=0,00047$; $III_1=20$; $III_2=5$; $III_\epsilon=0,2$; $W_0=12$ %; $T_0=20$, °C.

На рис. 2-5 показано розподіл температури, вологісних полів і тиску парогазової суміші у процесі пресування для різних точок деревностружкового пакету.

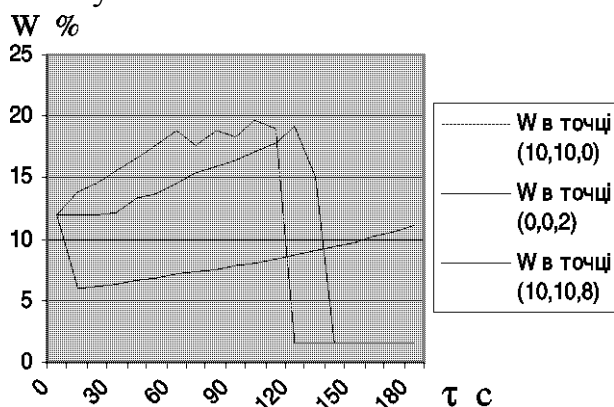


Рис. 2. Розподіл вологості у процесі пресування

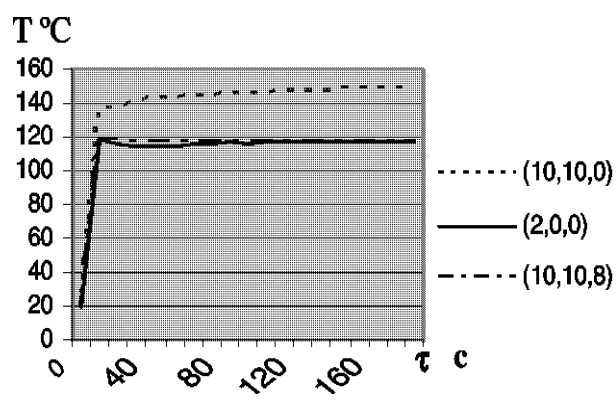


Рис. 3. Розподіл температури в процесі пресування

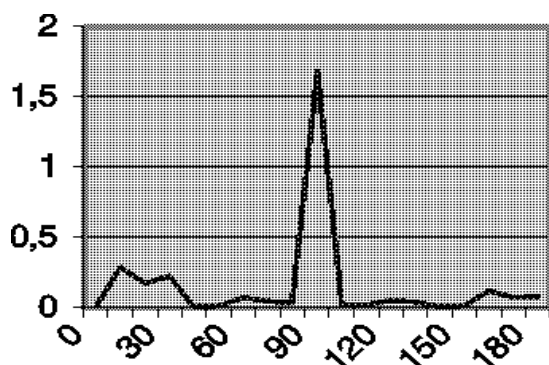


Рис. 4. Розподіл тиску на поверхні пакету, паралельній плитам пресу

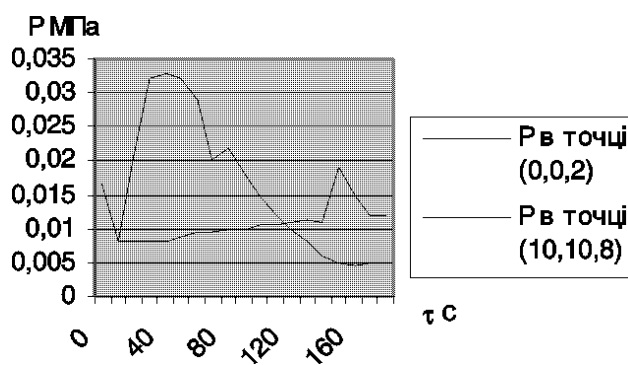


Рис. 5. Розподіл тиску у середині і на торці пакету

На етапі зростання тиску пресування проходить ущільнення пакету до товщини 16 мм і досягається максимальна дія пресу. Враховуючи, що пресування ДСП є високотемпературним процесом, прогрівання взірця здійснюється на перших секундах пресування [5] і завершується в першій половині даного етапу (рис. 3, 9). На початку пресування, на проміжку 0-30 с, значні потоки нагрітої парогазової суміші проникають у середину пакету, де температура пакету є трохи нижчою, і спричиняють підвищення тиску (рис. 5). Незначне підвищення тиску спостерігається і на зовнішніх площинах, паралельних до плит пресу, оскільки ущільнення пакету спричиняє витіснення повітря. В середині взірця відбувається інтенсивне випаровування (рис. 2), тиск досягає точки насичення вже на $\tau \sim 30$ с. Насичена парогазова суміш повертається на поверхню, збільшуючи вологість та тиск взірця. На даному етапі стан клею наближується до гелеподібного (рис. 7).

На етапі сталої зміни тиску пресування товщина взірця залишається незмінною, тиск пресу досягає максимального значення, а плити пресу заважають вільному обміну парогазової суміші із зовнішнім середовищем. Це спричиняє зростання тиску як на поверхні, паралельній плитам пресу, так і на бокових поверхнях взірця (рис. 5), оскільки частина парогазової суміші через торці потрапляє в атмосферу. Крім того, на поверхнях збільшується вологість, що приводить до "підсихання" взірця зсередини (рис. 2). На цьому етапі ($\tau \sim 100$ с) відбувається кінцеве твердіння клею (рис. 7).

На етапі зменшення тиску пресування парогазова суміш вільно потрапляє в атмосферу, що призводить до різкого зниження і стабілізації тиску на поверхні та всередині взірця. Вологість поверхні пакету істотно зменшується, а самі приповерхневі шари виступають як провідник між внутрішніми шарами та атмосферою. Деяке, незначне збільшення тиску на поверхні спричинене накопиченням парогазової суміші в середині пакету (рис. 5). Оскільки пакет стає малопроникливим, що зв'язане з твердінням клею (рис. 7), в середині пакету відбувається деяке накопичення парогазової суміші, що сприяє збільшенню вологості (рис. 2). Розподіл тиску (рис. 6) та вологості (рис. 8) за товщиною пакету в часі підтверджують правильність проведеного аналізу графічних залежностей (рис. 2-5, 7). Характер зміни вологості у процесі пресування для різних точок пакету залежно від зміни його густини і початкової вологості показано на рис. 10-11. Графічні залежності на рис. 10 відповідають розподілу вологості у точці (0,10,0). Відповідно крива 1 відповідає $\rho=600 \text{ кг/м}^3$, $W_0=10\%$; крива 2 – $\rho=600 \text{ кг/м}^3$, $W_0=12\%$, а крива 3 – $\rho=600 \text{ кг/м}^3$, $W_0=14\%$. Зі збільшенням густини і початкової вологості тиск парогазової суміші у центрі деревностружкового пакету збільшується. Особливо збільшення $P(b, l, h/2)$ спостерігається для $W=10\div12\%$, яка є перехідною від зв'язаної вологи до вільної у приповерхневих шарах пакету для даних умов. Збільшення температури пресування зумовлює зростання тиску парогазової суміші у центрі пакету.

Вологісні криві нестационарного вологісного поля наведено на торці пакету у точці (0,0,2) на рис. 11. Криві 1, 2, 3 отримані для значення густини

$\rho=600 \text{ кг/м}^3$ і різних початкових вологостей, аналогічних для попереднього випадку. У процесі чисельного експерименту вивчалась також зміна густини для різних значень початкової вологості та розподіл вологісного поля.

Необхідно зазначити, що якісний характер зміни вологості окремих шарів є подібним, незалежно від місця розташування за площиною стружкового пакету. Максимального значення вологісне поле досягає у середніх шарах, ніж на торцях. Це опосередковано свідчить про те, що у процесі пресування існує градієнт тиску, направлений до середини пакету. Саме він сприяє молекулярному вологоперенесенню у напрямі, паралельному площині пакету. Після початку пресування вологість поверхневих і приповерхневих шарів на торцевих зонах пакету є більшою ніж для середнього шару. Але для внутрішнього шару вологість у середині пакети є більш вищою, ніж на торцевих зонах. Це зумовлено тим, що залишковий тиск у середніх шарах деревностружкового пакету з прогріванням їх до температури $100-105^\circ\text{C}$ спричиняє переміщення водяної пари як у середині пакету, так і у напрямі від середини до торцевих зон.

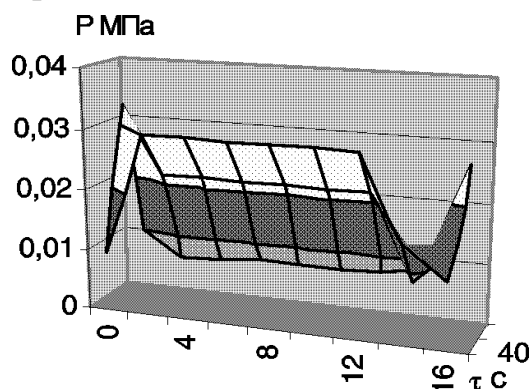


Рис. 6. Розподіл тиску за товщиною пакету

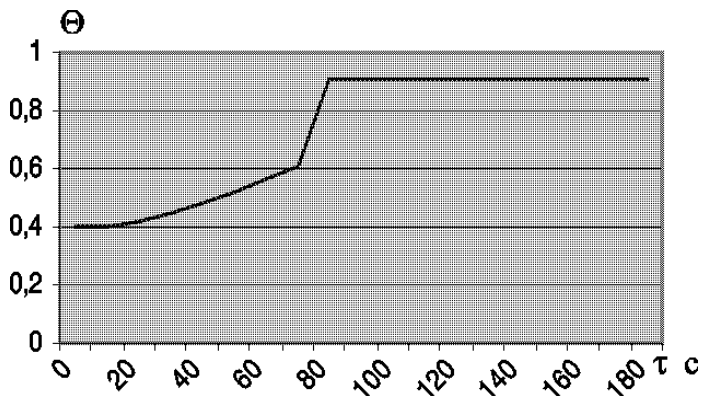


Рис. 7. Динаміка твердіння клею

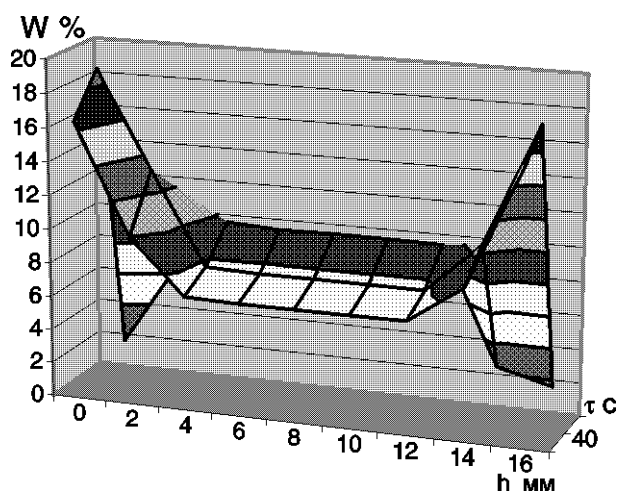


Рис. 8. Розподіл вологості за товщиною пакету

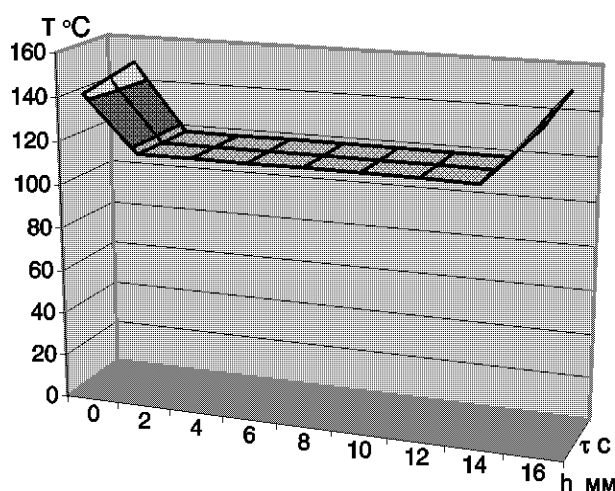


Рис. 9. Розподіл температури за товщиною пакету

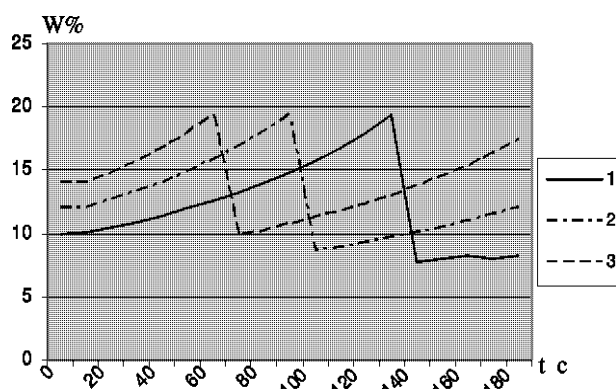


Рис. 10. Розподіл вологості у процесі пресування (точка (0,10,0))

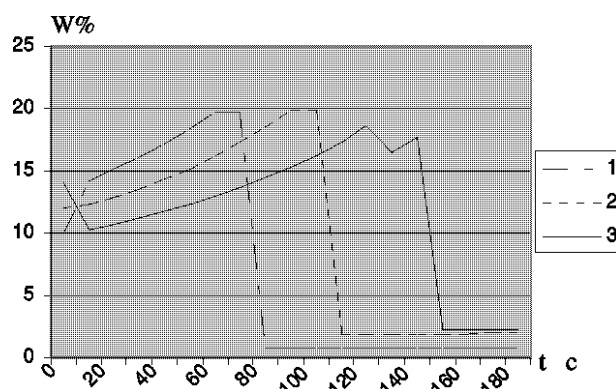


Рис. 11. Розподіл вологості у процесі пресування (точка (0,0,2))

На основі синтезованої фізико-математичної моделі та розробленого програмного забезпечення з використанням скінчено-різницевого методу проаналізовано вплив основних технологічних факторів на розподіл температурно-вологісних полів і тиску парогазової суміші у деревностружковому пакеті в процесі пресування. Криві розподілу тиску парогазової суміші характеризуються максимальними значеннями як на площині, так і в середині пресованого пакету. Збільшення початкової вологості пакету зумовлює швидше прогрівання як приповерхневих, так і внутрішніх шарів, що збільшує теплопровідність пакету. Але із досягненням температури пакету значення температури фазового переходу у силу витрати теплової енергії на випаровування води вплив механізму теплопровідності сповільнюється. Характер зміни вологості спричинює градієнт тиску, який скерований до середнього шару пакету, що зумовлює молярне перенесення паралельно площині пакету.

Література

1. Бехта П.А. Технологічні розрахунки у виробництві ДСП. – К: ІСДО, 1994. – 156 с.
2. Ганцюк В.М. Інтенсифікація процесу пресування ДСП в установках безперервної дії/ Автореф. ... дис. канд. техн. наук. – Л: УкрДЛТУ. – 1996. – С. 18.
3. Лавриченко И.А. Исследование процесса пресования ДСП/ Автореф. ... дис. канд. техн. наук. – М: МЛТИ. – 1971. – С. 19.
4. Отлев И.А., Жуков Н.И. Оптимальная диаграмма пресования ДСП при// Деревообрабатывающая пром-сть. – 1988, № 6. – С. 8-10.
5. Обливин А.Н. Тепло- и массоперенос в производстве древесностружечных плит. – М.: Лесн. пром-сть, 1978. – 191 с.
6. Пожиток А.И., Шевляков А.А. Гидродинамика контактного слоя стружечного пакета// В сб. научн. тр. МЛТИ. – М.: МЛТИ. – 1987, вып. 196. – С. 80-88.
7. Сагаль С.З. Исследование гидродинамических характеристик древесно-стружечного пакета/ Автореф. ... дис. канд. техн. наук. – М: МЛТИ. – 1981. – С. 4- 21.
8. Соколовський Я.І., Петрів О.М. Чисельне моделювання нестационарних полів тепломасоперенесення в процесі пресування деревностружкових плит// Наук. вісник УкрДЛТУ: Зб. наук.-техн. праць. – Львів: УкрДЛТУ. – 2004, вип. 14.4. – С. 57-59.
9. Humphrey P.F., Bolton A.J. The hot pressing of dry-formed Wood-based composites. A simulation model for heat and moisture transfer// Holzforschung 43 № 3, 1989 P. 199-206.
10. Frünwald A., Steffen A., Humphrey P.E., Haas G.V. Entwicklung und Überprüfung eines Modells des thermodynamischen und des rheologischen Verhaltens von Fassermatten für MDF während der Heispressung in Taktpressen und Ansätze zur modelirung von Endlosrpessen. – Universität Hamburg, 1999.