

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ І ДЕФОРМАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ПРЕСУВАННЯ ДЕРЕВНИХ КОМПОЗИТИВ

© Соколовський Я., Петрів О., 2008

Розроблено нову модель тепломасообмінних та деформаційних процесів під час пресування деревних композитних матеріалів. На основі числової реалізації моделі на прикладі деревостружкової плити виявлено закономірності впливу тепломасоперенесення на деформацію і напруження матеріалу та розроблено на цій основі математичну модель оптимізації режимних параметрів пресування.

The new model of teplotmasoobminnikh is developed and processes of deformations during pressing of arboreal composite material. On the basis of numeral realization of model, on the example of derevnostruzhkovoy flag, found out conformities to the law of influencing of teplotmasoperenesennya on deformation and tension of material and the mathematical model of optimization of parameters of regimes of pressing is developed on this basis.

### Актуальність проблеми та аналіз відомих результатів

Вдосконалення та впровадження енергоощадних технологій є однією з головних умов успішного розвитку промисловості, зокрема деревообробної. У вирішенні цієї проблеми значну роль відіграє розробка математичних моделей дослідження технологій виробництва композиційних матеріалів, зокрема деревостружкових плит. У виготовленні деревостружкових плит (ДСП) визначальною є операція пресування, яка значно впливає на якість плити та найбільш енергомістка. Процеси, що відбуваються у деревних композитних матеріалах, зокрема в ДСП, під час пресування у пресах, характеризуються складністю взаємопов'язаних різних за характером фізико-механічних і хімічних величин та фазових перетворень й істотно залежать від вологості, температури, густини та структури плити. Розробленню математичних моделей деформаційно-релаксаційних і тепломасообмінних процесів під час пресування деревних композитних матеріалів присвячено низку досліджень. Проте наявні моделі не повністю відображають складну багатогранну картину динаміки гідробаротермічних полів, зокрема не враховують анізотропію фізико-механічних властивостей матеріалу, їх залежність від зміни температури і вологості, не враховують відведення парогазової суміші через поверхню плити, що паралельна до плит пресу. Тому сьогодні залишається актуальним завдання побудови таких математичних моделей, які б пов'язували технологічні параметри певного матеріалу і параметри пресування з тепломасообмінними процесами і, враховуючи вплив цих процесів на реологічну поведінку деревного композиту, визначали його напруження і деформацію під час пресування. Результати реалізації таких моделей повинні бути основою для побудови оптимізаційних моделей технологічного процесу. Такий підхід зумовлює також розроблення числових алгоритмів і відповідного програмного забезпечення. Для моделювання тепломасообмінних процесів у роботах [6–8, 10] для дослідження тепломасоперенесення розроблені математичні моделі, які пов'язують параметри пресування та технологічні параметри композиту із зміною основних теплофізичних величин (температурою та вологістю матеріалу, тиском парогазової суміші). Для визначення напружено-деформаційного стану деревного композиту на прикладі деревостружкової плити в працях [9, 5] використано стандартні реологічні моделі, побудовані з пружних та еластичних з'єднань елементів і на їх основі здійснено математичний опис зміни внутрішніх сил в плиті. Проте існуючі математичні моделі, зокрема моделювання напружено-деформованого стану, не враховують вплив початкових параметрів плити та параметрів пресу-

вання, не відстежують закономірність зв'язку тепломасоперенесення з деформаційно-релаксацийним станом. Тому існує об'єктивна необхідність побудови нової математичної моделі, яка б пов'язувала тепломасоперенесення з реологічною поведінкою деревного композиту з врахуванням його стохастичної неоднорідності і давала б змогу виявити закономірність впливу основних теплофізичних величин, які характеризують цей процес, на напружено-деформований стан матеріалу.

### Математична модель тепломасоперенесення

Синтез математичної моделі тепломасоперенесення в деревному композиті ґрунтується на законах перенесення маси речовини Дарсі, Фур'є та Фіка з врахуванням анізотропії теплофізичних властивостей. Для цього розглянуто в декартовій системі координат XYZ його елементарний об'єм із заданими геометричними розмірами  $V = \{0 \leq x \leq b, 0 \leq y \leq 1, 0 \leq z \leq h\}$ , на зовнішніх поверхнях якого діє прес з тиском  $P_{pr}$  і температурою  $T_{pr}$ . Тепломасоперенесення в кожний момент часу  $\tau$  визначатиметься такими характеристиками: температурою  $T(x, y, z, \tau)$  і вологістю плити  $U(x, y, z, \tau)$ , тиском парогазової суміші  $P(x, y, z, \tau)$ , ступенем тверднення клею  $\theta(x, y, z, \tau)$ . Вважаємо, що осі анізотропії матеріалу збігаються з геометричними осями координат.

Для визначення  $T(x, y, z, \tau)$ ,  $U(x, y, z, \tau)$ ,  $P(x, y, z, \tau)$ ,  $\theta(x, y, z, \tau)$  на основі базових рівнянь побудовано математичну модель, що є системою диференціальних рівнянь [1, 2].

Рівняння визначення тиску парогазової суміші з врахуванням анізотропії фільтраційних властивостей тіла на основі закону збереження маси має вигляд:

$$PR \frac{\partial \rho_p}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial P(x, y, z, \tau)}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial P(x, y, z, \tau)}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial P(x, y, z, \tau)}{\partial z} \right) + \rho_b \frac{\partial U}{\partial \tau} = 0, \quad (1)$$

де  $k_x, k_y, k_z$  – коефіцієнти фільтрації в напрямку осей, які залежать від температури, вологовмісту та густини матеріалу;  $\rho_b, \rho_p$  – густина води та пари;  $PR$  – пористість матеріалу;  $U$  – його вологовміст.

Перенесення енергії у пористому тілі визначається механізмом теплопровідності, а також конвекцією внаслідок руху парогазової суміші в порах тіла, із врахуванням теплових ефектів  $Q_{ef}$ , що супроводжують процеси випаровування вологи і конденсації пари.

$$c(U, T) \rho \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \sum_{i=1}^3 \left( \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda_i(U, T) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial x_i} + C_{pg} \left( k_{x_i} \frac{\partial P(x, y, z, \tau)}{\partial x_i} \right) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial x_i} \right) \right) + Q_{ef}, \quad (2)$$

де  $\{x_i\} = (x, y, z)$ ;  $(\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z)$  – коефіцієнти теплопровідності в напрямку осей, які залежать від температури, вологовмісту та густини матеріалу;  $c(U, T)$  – питома теплоємність тіла;  $C_{pg}$  – питома теплоємність парогазової суміші;  $\rho$  – густина матеріалу.

Вміст вологи на різних стадіях пресування визначиться

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = \frac{100}{\rho} \begin{cases} SH_1 (P_{pn} - P)^2; & P \geq P_{pn}; \\ -\beta_v (P_{pn} - P) \chi; & P_{pn} - P_g < P \leq P_{pn}; \\ -SH_2 \left( (P_{pn} - P - P_g)^2 + \beta_v P_g \right) \chi; & P_{pn} \geq P_g + P, \end{cases} \quad (3)$$

де  $SH_1, SH_2, SH_\varepsilon$  – параметри функції штрафу;  $P_{pn}$  – тиск насиченої пари;  $P_g$  – тиск газу;  $\beta_v$  – об'ємний коефіцієнт масообміну, віднесений до різниці масових концентрацій;  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості;  $k_0$  – коефіцієнт проникності тіла;  $\beta_v = 1,8 \cdot 10^{-4} \Lambda(T) \cdot (k_0 \mu / \rho)^{0,265} \mu^{0,49} (\partial P / \partial x)^{0,43}$ ;  $\Lambda(T) = 21,9 \cdot 10^{-6} (T/273)^{1,5}$ ;  $\chi = \arctan(U / SH_\varepsilon)$ .

Математичну модель (1) – (3) адаптовано для визначення тепломасоперенесення під час пресування деревостружкової плити, враховуючи, що ДСП – це капілярно-пористе тіло, яке складається з наповнювача – деревної стружки та полімерної матриці – клею, що її зв'язує. А

процес пресування розглянуто як контактне нагрівання капілярно-пористого тіла, яке супроводжується внутрішнім тепло- і масоперенесенням, яке зумовлене рухом парогазової суміші з врахуванням фазових переходів. Оскільки теплофізичні і фільтраційні характеристики матеріалу у напрямках анізотропії є змінні в часі і залежать від вологовмісту та температури плити, то для їх визначення використано існуючі емпіричні залежності. Зокрема, фільтраційні характеристики плити є змінні в часі і залежать від її густини  $\rho$ , діаметра пори  $d$ , концентрації клею  $C_c$  та кількості затверджувача  $m$ . А коефіцієнти теплопровідності залежать від основних величин тепломасоперенесення і визначені відомими емпіричними залежностями

$$\lambda_z = \left( \frac{\rho^2}{111 \cdot 10^5} + 0,062 \right) (1 + 0,0018(T - 25));$$

$$\lambda_x = \lambda_y = \left( \frac{\rho^2}{111 \cdot 10^5} + 0,062 \right) (1 + 0,0018(T - 25)) (1,6 + 0,002U).$$

Оскільки процес пресування супроводжується випаровуванням та конденсацією пари і твердненням клею, то

$$Q_{ef} = \rho_b r \frac{\partial U(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} + r M \rho_{st} (1 - PR) \frac{\partial \theta(x, y, z, \tau)}{\partial \tau},$$

де  $\rho_{sk}$  – густина стружки;  $r$  – питома теплота фазового переходу;  $M$  – відношення маси сухого клею до маси сухої стружки.

Фільтраційні властивості плити істотно залежать від ступеня тверднення клею, тому математичну модель тепломасоперенесення у деревостружковій плиті під час пресування, побудовану на основі (1) – (3), доповнено рівнянням кінетики тверднення клею

$$\frac{\partial \theta(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \begin{cases} (1 - \theta(x, y, z, \tau)) f(T, C_c, m); & \theta < \theta_{gs}; \\ (\theta_k(T) - \theta) f(T, C_c, m); & \theta_{gs} \leq \theta \leq \theta_k(T); \\ 0; & \theta > \theta_k(T), \end{cases} \quad (4)$$

де  $f(T_{kl}, C_c, m)$  описує швидкість тверднення, що залежить від температури, а  $\theta_{gs}$ ,  $\theta_k$  визначають перехід клею в гелеподібний стан та його затверднення.

Для синтезованої моделі тепломасоперенесення задано початкові та граничні умови, зумовлені особливостями технологічного процесу. Шукані значення величин  $T(x, y, z, \tau)$ ,  $U(x, y, z, \tau)$ ,  $P(x, y, z, \tau)$ ,  $\theta(x, y, z, \tau)$  рівномірно розподілені за товщиною плити і на початку пресування мають значення  $T_0, P_0, U_0, \theta_0$ .

Тепломасоперенесення у зовнішніх шарах має інший характер, тому задано граничні умови теплообміну та масоперенесення на паралельних до преса і бокових поверхнях плити.

Умови теплообміну на поверхнях, паралельних до преса ( $i=0$ ;  $i=h$ ), визначено за формулою  $T(x, y, i, \tau) = T_{pr} - A_0 e^{-k\sqrt{\tau}}$ , де  $A_0, k$  – емпіричні константи.

Граничні умови теплообміну на бокових поверхнях характеризують теплообмін із зовнішнім середовищем:

$$\lambda_x \frac{\partial T(0, y, z, \tau)}{\partial x} + \alpha''_x (T_c - T(0, y, z, \tau)) = 0; \quad \lambda_x \frac{\partial T(b, y, z, \tau)}{\partial x} + \alpha''_x (T_c - T(b, y, z, \tau)) = 0; \quad (5)$$

$$\lambda_y \frac{\partial T(x, 0, z, \tau)}{\partial y} + \alpha''_y (T_c - T(x, 0, z, \tau)) = 0; \quad \lambda_y \frac{\partial T(x, l, z, \tau)}{\partial y} + \alpha''_y (T_c - T(x, l, z, \tau)) = 0, \quad (6)$$

де  $\alpha''_x, \alpha''_y$  – коефіцієнт теплообміну вздовж відповідних осей.

Граничні умови масоперенесення на площинах, паралельних до преса ( $i=0$ ;  $i=h$ ), визначає умова  $-k'_p \frac{\partial P(x, y, 0, \tau)}{\partial z} + \beta'_p (P_a - P(x, y, i, \tau)) = 0$ , де  $k'_p$  – гідродинамічний коефіцієнт контактного шару, а  $\beta'_p$  – коефіцієнт вологообміну між поверхнею плит і деревостружковою плитою,  $P_a$  – атмосферний тиск.

Граничні умови масоперенесення на бокових поверхнях задаються аналогічно, із введенням відповідного гідродинамічного коефіцієнта та коефіцієнта вологообміну для бокових поверхонь. Всі вказані в рівняннях коефіцієнти є функціями основних теплофізичних величин.

### Математична модель деформаційно-релаксаційних процесів

Зміна температури, тиску та вологості спричиняє в капілярно-пористому тілі виникнення напружень і деформацій. Оскільки деревостружкова плита розглядається як матеріал із стохастично розміщеними неоднорідностями, то на основі відомих підходів статистичної механіки деформація плити розглядається як випадкова величина, значення якої в кожній точці залежить від її розміщення. Можливі три варіанти розміщення точки у матеріалі: деревна стружка, клей та лінія зв'язки стружка-клей. Тому деформацію матеріалу є визначено співвідношенням

$$\epsilon = \epsilon_{st} p_{st} + \epsilon_{kl} p_{kl} + \epsilon_{sk} p_{sk}, \quad (7)$$

де  $p$  – ймовірність відповідних деформацій ( $st$  – стружка,  $kl$  – клей,  $sk$  – лінія зв'язки стружка-клей).

На основі рівняння (7) вперше [3] отримано залежність для визначення деформації під час пресування деревостружкової плити

$$\epsilon = \frac{(k_{st} \Delta U + \beta''_{st} \Delta T) + (k_{kl} \Delta U + \beta''_{kl} \Delta T) \xi_{kl}}{2} + I_v \left[ (\beta_1^* - \beta_2^*) \Delta T + (\gamma_1^* - \gamma_2^*) \Delta U \right]. \quad (8)$$

Деформацію стружки обчислено як середнє значення суми добутків приросту температури  $\Delta T$  на коефіцієнт температурного розширення  $\beta''_{st}$  і приросту вологості  $\Delta U$  на коефіцієнт вологісного розширення  $k_{st}$ . Деформацію клею визначено за подібною залежністю, використовуючи коефіцієнти температурного  $\beta''_{kl}$  та вологісного розширення  $k_{kl}$ , а також об'ємний вміст клею в плиті  $\xi_{kl}$ .

Враховуючи стохастичність розміщення неоднорідностей, деформацію стиків стружка – клей на основі функції впливів Кельвіна–Самільяна записано як суму впливів на елементарний об'єм –  $I_v \left[ (\beta_1^* - \beta_2^*) \Delta T + (\gamma_1^* - \gamma_2^*) \Delta U \right]$ . А коефіцієнти вологісного розширення плити  $\gamma_1^*, \gamma_2^*$ , коефіцієнти температурного розширення  $\beta_1^*, \beta_2^*$ , коефіцієнти впливів стиків стружка-клей вздовж відповідних осей  $I_i$  визначаються відовими аналітичними залежностями, адаптованими для ДСП.

Для моделювання напруження в матеріалах з реологічною поведінкою використовується рівняння Больцмана–Вольтери  $\sigma(t) = E(U, T) \epsilon(U, T) + \int_0^t K(U, T, \tau - t) \epsilon(T, U, \tau) dt$ , де  $E(U, T)$  визначає пружну складову;  $K(U, T, \tau - t)$  – ядро релаксації. Оскільки деревину та виготовлений на її основі матеріал відносять до класу реологічних, то напруження у плиті під час пресування визначається залежністю [3]

$$\sigma(t) = \frac{1}{\beta''} (A_1 + A_2) \epsilon(U, T) + \left[ - \int_0^t \frac{1}{\beta''} a' A_1 e^{a'(t-\tau)} \epsilon(U, T) d\tau - \int_0^t \frac{1}{\beta''} A_2 b' e^{b'(t-\tau)} \epsilon(U, T) d\tau \right]. \quad (9)$$

Отримані на основі апроксимування методом найменших квадратів відових експериментальних даних деформацій повзучості, реологічні характеристики  $\beta''$ ,  $a'$ ,  $b'$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  мають вигляд

$$\beta'' = 0,000741121\rho + 0,01598; a' = [10^{-4}(-3,450335377)T^2 - 0,1264T - 21,1U^2 - 7,48U] 8 * 10^{-5} \rho;$$

$$b' = 0,002\rho(-5,62U - 0,003839T + 0,568); A_1 = 1,6 e^{0,0041\rho - 9U - 0,007T}; A_2 = -1,2436 e^{0,00735\rho - 0,174U - 0,05117T}.$$

Математична модель (8) – (9) реологічної поведінки деревостружкової плити визначає зв'язок напруження з деформацією та основними технологічними параметрами – температурою, вологістю та густиною плити. Отже, побудовані в роботі математичні моделі тепломасоперенесення і реологічної поведінки деревостружкової плити дають змогу встановити закономірності впливу тепломасоперенесення на деформацію та напруження в деревностружковій плиті.

Оскільки аналітичного розв'язку синтезованої математичної моделі тепломасоперенесення, що є системою чотирьох диференційних рівнянь, знайти не вдалось, то для її числової реалізації використано

різницевий метод, неявна схема якого є абсолютно стійкою. Підставивши до (1) – (4) замість коефіцієнтів системи вирази для їх визначення, отримано систему нелінійних рівнянь відносно невідомих температури, вологовмісту, тиску парогазової суміші та ступеня тверднення клею в кожному внутрішньому вузлі  $(i,j,k)$  просторової сітки для кожного вузла  $\tau$  просторової сітки.

Отриману систему рівнянь розв'язано методом Ньютона. На основі визначених невідомих величин  $T(x,y,z)$ ,  $P(x,y,z)$ ,  $U(x,y,z)$ ,  $\theta(x,y,z)$  за математичною моделлю (8) – (9) визначено деформацію і напруження деревостружкової плити під час пресування. Для проведення цих розрахунків розроблено пакет прикладних програм, вхідними даними якого є: геометричні розміри плити та фракцій стружки; параметри пресування; технологічні параметри плити; температурно-вологісні та механічні характеристики плити, деревної стружки та клею, а вихідними – температура, вологість плити, тиск парогазової суміші, ступінь тверднення клею, деформація та напруження плити у заданій точці у вибраний момент часу пресування.

### Аналіз результатів числового експерименту

На основі результатів числового розв'язання моделей (1)–(6), (8), (9) досліджено закономірності зв'язку тепломасоперенесення і деформаційних процесів під час пресування деревостружкових плит.

Зокрема встановлено, що при зімкненні плит преса на зовнішній поверхні ДСП спостерігається інтенсивне випаровування. Про це свідчить зростання тиску парогазової суміші, величина якого є обернено пропорційною відстані до зовнішньої поверхні плити (рис. 1). На цій ділянці деревостружкової плити зростає і вологість, причому інтенсивніше для плит з більшою початковою вологістю (рис. 2). Надалі вологість та тиск преса набувають пульсуючого характеру, проте істотно не залежать від початкової вологості ДСП. Тому в роботі зроблено висновок, що надлишок парогазової суміші поступово відводиться через торці та проміжок між плитами преса до зовнішнього середовища, а значення величин  $P(x,y,z,\tau)$ ,  $W(x,y,z,\tau)$  (відсоткове представлення вологовмісту  $U$ ) пов'язане з розміром деревної стружки, який впливає на проникливість плити.

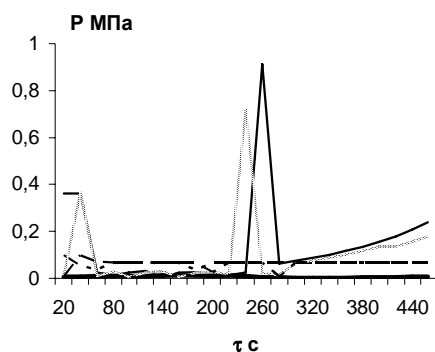


Рис. 1. Розподіл тиску парогазової суміші під час пресування в деревостружковій плиті

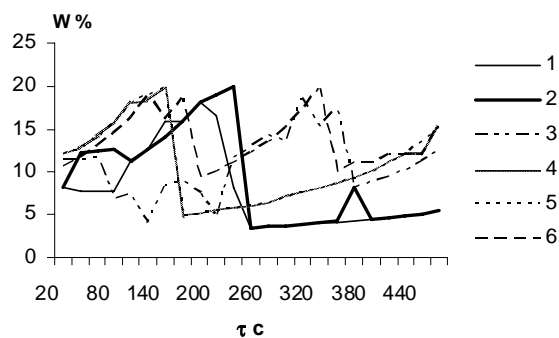


Рис. 2. Розподіл вологості під час пресування по товщині деревостружкової плити

На рис. 1,2 пронумеровані криві визначають такі ділянки деревостружкової плити: 1 – площа пресування, 2 – торець, 3 – центр плити,  $W_0=8\%$ ; 4 – площа пресування, 5 – торець, 6 – центр плити,  $W_0=12\%$  для  $P_{pr}=2,5$  МПа,  $T_{pr}=190$  °С,  $W_0$  – початкова вологість плити

Аналізуючи вплив початкової температури та тиску преса, зроблено висновок, що зовнішня поверхня плити прогрівається миттєво, і температура на цій ділянці плити істотно не залежить від режимних параметрів пресування (рис. 3, 4). Проте зміна температури та вологості внутрішніх шарів ДСП істотно залежить від значень  $T_{pr}$ ,  $P_{pr}$ .

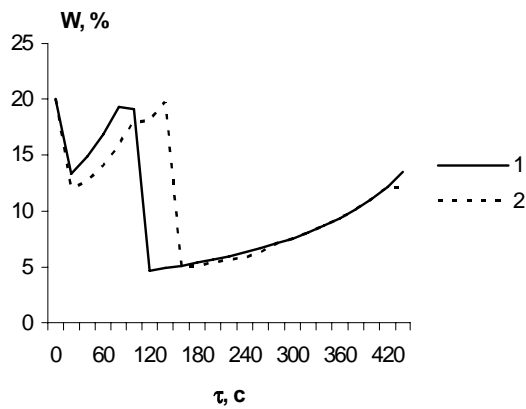


Рис. 3. Розподіл вологості на поверхні плити, яка паралельна до преса

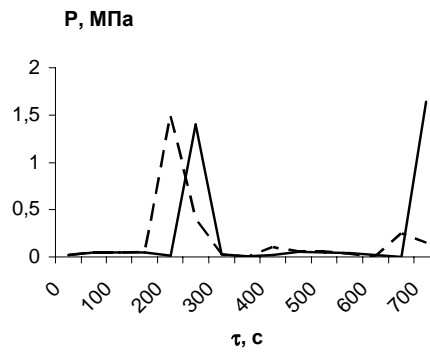


Рис. 4. Розподіл тиску парогазової суміші на зовнішній поверхні плити

На рис. 3, 4 введені такі позначення: крива 1 задає відповідні величини для  $P_{pr}=2$  МПа, а крива 2 –  $P_{pr}=2,5$  МПа. Дослідження проведено для  $T_{pr}=190$  °С,  $W_0=12\%$ .

Зміна температурно-вологісного стану деревостружкової плити зумовлює її деформації, які спричиняють напруження в плиті як на її поверхні, так і у внутрішніх шарах (рис. 5).

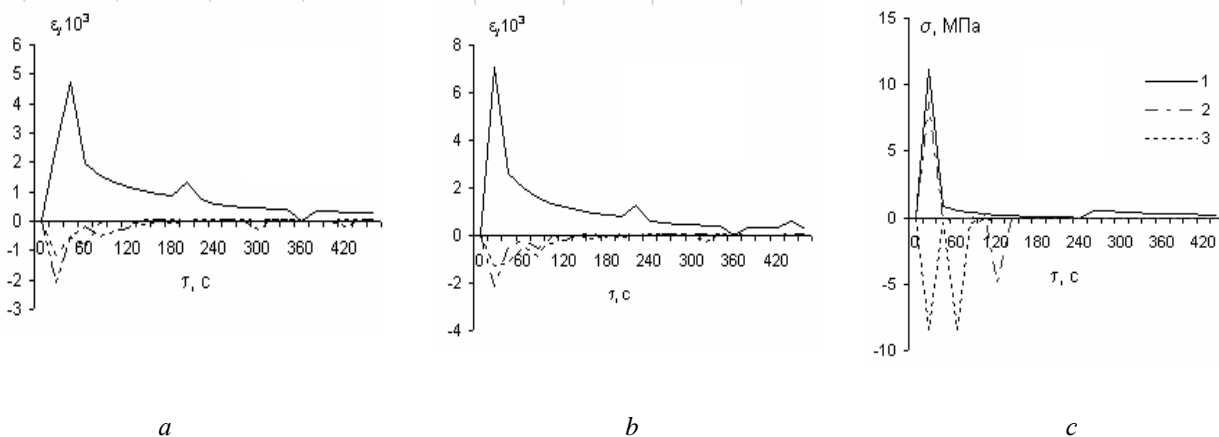


Рис. 5. Повздожня (а) і поперечна (b) деформації, а також напруження (с) в плиті під час пресування: крива 1 – поверхня плити; 2 – торець плити; 3 – центр плити.  $W_0=12\%$  для  $P_{pr}=2,5$  МПа,  $T_{pr}=190$  °С

Найбільші деформації в ДСП виникають на початку пресування при її ущільненні і залежать від тиску преса та фракційності плити. В середині циклу пресування деформації плити тісно пов'язані з її вологістю (рис. 5, а, b), а напруження в плиті є незначним (рис. 5, с). Деяке збільшення деформації та напруження в плиті спостерігається в момент розкриття плит преса. Проте, порівнявши величину тиску парогазової суміші (рис. 1) та напруження в плиті (рис. 5, с), зроблено висновок, що головним чинником руйнування в плиті після зняття дії преса є парогазова суміш.

#### Аналіз результатів експериментальних досліджень та підтвердження адекватності розробленої математичної моделі

За методикою, описаною в [4], проведено експериментальні дослідження, які виявили вплив основних факторів пресування на значення температури деревостружкової плити, та обґрунтовано адекватність математичної моделі тепломасоперенесення на основі експериментальних даних.

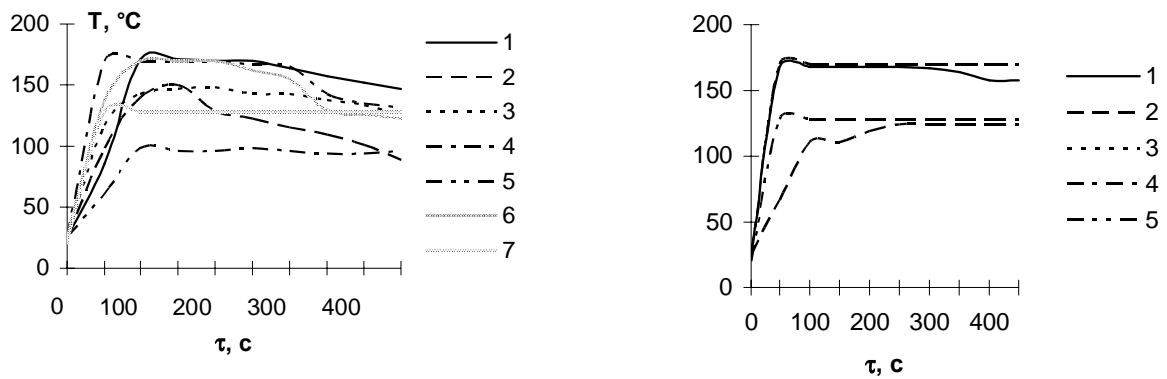


Рис. 6. Порівняння експериментальних та розрахованих значень температури у внутрішньому (а); у зовнішньому (b) шарі деревостружкової плити під час пресування при  $P_{pr}=2,5$  МПа;  $T_{pr}=170$  °С, Криві 1 – 4,6,7 експериментальні; крива 5 – результати числової реалізації моделі тепломасоперенесення

Обчислене та експериментальне значення температури збігаються з точністю 16,8%. Криві, що характеризують зміну тиску парогазової суміші, температури, вологості плити, деформацію і напруження, якісно збігаються з кривими, побудованими за відомими результатами досліджень у часткових випадках інших авторів. Отже, розроблена математична модель задовільно визначає залежність між основними теплофізичними величинами і напружено-деформаційним станом плити. Дані експериментальних досліджень підтверджують результати, отримані при числовій реалізації моделі.

### Математична модель оптимізації режимів пресування

Базова діаграма пресування складається з таких проміжків часу:  $[\tau_0, \tau_1]$  – наростання дії преса;  $[\tau_1, \tau_2]$  – зімкнення плит преса та його постійна дія;  $[\tau_2, \tau_3]$  – підняття плит преса з дистанційних планок. Аналіз часової зміни тиску парогазової суміші в ДСП на  $[\tau_1, \tau_2]$  (рис. 1, 4), показує, що максимальне значення  $P(x,y,z,\tau)$  досягається в деякий момент часу  $\tau_k$ , для якого процес тверднення клею завершився ( $\theta=\theta_k$ ), а плита прогріта не менш ніж до 100 °С. Тому відведення парогазової суміші істотно не впливає на прогрівання ДСП. Власне в цей момент часу доцільно для інтенсивнішого відведення пари з деревостружкової плити до зовнішнього середовища поступово послаблювати тиск преса, не піднімаючи його з дистанційних планок. Тому запропоновано таку діаграму пресування

$$P_{pr} = \begin{cases} \alpha e^{\alpha_1 \tau} & 0 < \tau < \tau_1; \\ P_{const} & \tau_1 \leq \tau \leq \tau_k; \\ \gamma_1 e^{-\beta \tau} + \gamma_2 & \tau_k < \tau < \tau_2; \\ \alpha'' e^{-\alpha_1'' \tau} & \tau_2 \leq \tau \leq \tau_3, \end{cases} \quad (10)$$

де  $\alpha, \alpha_1$  – константи, які задають базову діаграму пресування,  $P_{const}$  – тиск преса при зімкнених плитах. Коефіцієнти  $\beta, \gamma_1, \gamma_2$  визначають зміну величини тиску преса із досягненням часу  $\tau_k$ . Коефіцієнти  $\alpha'', \alpha_1''$  визначають величину тиску преса при його піднятті з дистанційних планок.

У роботі подано математичну модель оптимізації процесу пресування, розв'язком якої будуть значення невідомих коефіцієнтів  $\beta, \gamma_1, \gamma_2$ .

Цю задачу розв'язують покроковою оптимізацією за такою методикою.

1. На основі числової реалізації математичної моделі тепломасоперенесення (1) – (6) визначено момент часу  $\tau_k \in [\tau_1, \tau_2]$ , для якого тиск парогазової суміші  $P$  на поверхні плити є максимальним.

2. Коефіцієнти знаходять для оптимізованої діаграми (10) за виконання умови: різниця між тиском преса та рівнодійною всіх сил, що діють з боку плити, повинна бути мінімальною. У цьому випадку здійснюється покрокова оптимізація для кожного  $i$ -го інтервалу часу  $[\tau_i, \tau_{i+1}] \subset [\tau_k, \tau_2]$  тривалістю  $\Delta\tau$ . Позначимо для  $i$ -го моменту часу тиск парогазової суміші  $P^i$ , тиск преса через  $P_{pr}^i$ , напруження деревної стружки плити в напрямку, перпендикулярному до плит преса, – через  $\sigma^i$ , пористість плити –  $PR^i$ , напруження клейових швів –  $\sigma_{kl}$ , ступінь покриття клеєм –  $F_{kl}$ , а початкові густини плити та деревини –  $\rho_0$  і  $\rho_d$ , розтягову деформацію –  $\epsilon^i$ . Рівнодійна всіх сил з боку деревостружкової плити визначиться  $F_{pl}^i = P^i \cdot PR^i + \sigma^i(1 - PR^i) + \sigma_{kl}F_{kl}$ .

Тоді функція мети набуде вигляду:

$$F = \sum_{i=1}^{k\tau} (P_{pr}^i - F_{pl}^i)^2 \rightarrow \min, \quad (11)$$

де  $k\tau = (\tau_2 - \tau_k) / \Delta\tau$ . Для визначення пористості використано відому формулу

$$PR^i = 1 - \frac{\rho_0(1 + \epsilon^i)}{\rho_d}. \quad (12)$$

3. Задані обмеження полягають у тому, що тиск преса на початку кожного  $i$ -го часового проміжку повинен бути більший від максимального тиску парогазової суміші на цьому самому часовому інтервалі

$$\gamma_2^i e^{-\beta\tau} + \gamma^i > P^i. \quad (13)$$

У кожний наступний  $i$ -й момент часу тиск преса повинен бути не більшим ніж на попередньому  $i-1$ -му інтервалі

$$\gamma_2^i e^{-\beta\tau} + \gamma_1^i \leq P_{pr}^{i-1}. \quad (14)$$

Задачу розв'язуємо для проміжку часу від моменту затверднення клею та досягнення максимального значення тиску парогазової суміші на поверхні плити до розкриття плит преса

$$\tau_k \leq \tau^i \leq \tau_2. \quad (15)$$

Запропоновану модель апробовано для оптимізації діаграми пресування плити з такими технологічними параметрами: розміри стружки  $0,017 \times 0,035 \times 0,0014$  м; концентрація клею 0,65; концентрація закріпника 0,01; густина плити  $800 \text{ кг/м}^3$  та вологість  $W_0 = 8\%$ ,  $T_{pr} = 190 \text{ C}^\circ$ . Використовуючи отримані результати числової реалізації моделі (1) – (4), (8), (9) для плити із вказаними технологічними параметрами, визначено: момент часу  $\tau_k = 240$  с,  $P(x, y, z, \tau_k) = 1,63$  МПа,  $\theta(x, y, z, \tau_k) = 0,8$ ,  $\sigma_{\tau_k} = 0,002917$  МПа. Крім того,  $PR = 0,73$  та  $\sigma_{kl} = 0,008$  МПа. Межа міцності клейових зв'язок 1,42 МПа.

Базова діаграма пресування

$$P_{pr} = \begin{cases} 0,020294 e^{0,080232\tau} & 0 < \tau < 60; \\ 2,5 & 60 \leq \tau \leq 420; \\ 49,11138 e^{-0,00709\tau} & 420 < \tau < 600. \end{cases} \quad (16)$$

Під час пресування за діаграмою (16) в момент часу  $\tau_k = 240$  с починається інтенсивне випаровування парогазової суміші, яка через недостатні фільтраційні властивості плити та тиск преса, не може вільно виділятися через торці та поверхню плити. Це спричиняє стрибкоподібне збільшення тиску в приповерхневих шарах (рис. 7, суцільна лінія). Використання оптимізованої діаграми пресування (рис. 8) зменшує тиск пари в зовнішніх шарах, що унеможливує руйнування клейових зв'язок як на поверхні плити, так і у внутрішньому шарі.



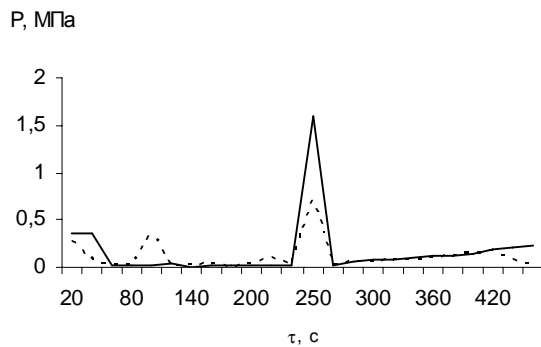


Рис. 7. Зміна тиску парогазової суміші на поверхні плити: суцільна лінія – базова, точкова – оптимізована діаграми пресування

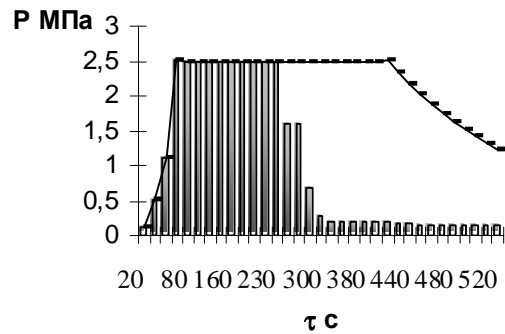


Рис. 8. Порівняння діаграм пресування деревостружкової плити: суцільна лінія – базова, гістограма – оптимізована

### Висновки

Розроблена просторова модель тепломасообмінних і релаксаційних процесів в деревостружковій плиті під час пресування дає змогу визначити і прогнозувати тепломасоперенесення та деформування деревних композитних матеріалів з наперед заданими механічними і теплофізичними характеристиками, а алгоритм оптимізації режимів пресування дасть змогу знизити ризик руйнування композитного матеріалу за рахунок зменшення тиску парогазової суміші в середині цього процесу.

1. Соколовський Я.І., Петрів О.М. Чисельне моделювання тепломасообмінних і деформаційно-релаксаційних полів під час пресування деревностружкових плит // Вісник Нац. ун-ту „Львівська політехніка”. – 2005. – №536. – С. 212–220.
2. Соколовський Я.І., Петрів О.М. Чисельне моделювання нестационарних полів тепломасоперенесення в процесі пресування деревностружкових плит // Науковий вісник: Зб. наук.-техн. праць. – Львів: УкрДЛТУ, 2004. – Вип. 14.4. – С. 57–59.
3. Соколовський Я.І., Петрів О.М. Дослідження напружено-деформованого стану деревностружкової плити під час гарячого пресування // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – № 1. – С. 43–49.
4. Петрів О.М. Результати експериментальних досліджень нестационарних температурних полів у процесі пресування деревностружкових плит // Науковий вісник : Зб. наук.-техн. праць. – Львів: УкрДЛТУ, 2005. – Вип. 15.3. – С. 152–157.
5. 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.– Hamburg: Universitat, 1999. – S.178.
6. Обливин А.Н. Теоретическое и экспериментальное исследование тепло- и массопереноса при контактном нагреве влажных пористых тел.: Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. – М., 1976. – 32 с.
7. Бехта П.А. Научно-технические основы изготовления деревяностружковых плит из заданую структуройю і властивостями: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Львів: УкрДЛТУ. – 1996. – С. 14 – 28.
8. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. – М., 1963. 536 с.
9. Соснин, М.И. Климова Физические основы прессования древесностружечных плит.– Новосибирск: Наука, 1981. – 190 с.
10. Гірник М.Л., Соколовський Я.І., Ганцюк В.М., Ільницький І.М. Теоретичні передумови моделювання тепломасообміну у капілярно-пористих тілах. – Львів: УкрДЛТУ. – 18 с.