

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ І ДЕФОРМАЦІЙНО-РЕЛАКСАЦІЙНИХ ПОЛІВ ПІД ЧАС ПРЕСУВАННЯ ДЕРЕВНОСТРУЖКОВИХ ПЛИТ

© Соколовський Я.І., Петрів О.М., 2005

Наведено фізико-математичну модель розрахунку динаміки температурно-вологісних полів, визначення напруження та деформації під час пресування деревностружкового пакета для змінної дії пресу. Здійснено чисельну реалізацію моделі та проаналізовано вплив тепломасообмінних полів на напруження та деформацію в різні етапи дії пресу.

The physico-mathematical model for calculation of the dynamics of thermal and moisture fields and determining of stresses and deformations is presented for variable action of press. The numerical realisation of the model has been done and influences of heat and mass transfer fields on stress and deformation was analysed at different stages of press action.

Актуальність досліджень. Обмеженість ресурсів деревини в Україні та значне підвищення на неї цін зумовлює використання композитних матеріалів, зокрема деревностружкових плит. Детальне дослідження та моделювання тепломасоперенесення, напруження, релаксації та деформації деревностружкових плит (ДСП) під час пресування дозволить вдосконалити цей процес, сприятиме підвищенню якості продукції та економії сировини і енергоносіїв.

Аналіз відомих результатів. Цю проблему розглянено в численних теоретичних та експериментальних роботах [1–5]. Зокрема в [4, 5] подано математичну модель динаміки тепломасообмінних полів та її чисельну реалізацію, на основі яких проаналізовано взаємозв'язок температурних, вологісних полів та внутрішнього тиску парогазової суміші під час пресування ДСП, врахувавши анізотропію теплофізичних властивостей матеріалу. В [7, 8] описано методику експериментів для визначення теплофізичних та реологічних властивостей ДСП. На основі використання пружно-деформерних моделей побудовано аналітичний вираз для знаходження напруження в одновимірному випадку. В [9] детально проаналізовано пружні деформації під час пресування ДСП, а також аналітично визначено пружний опір пакета під час пресування. У роботі [6] подано метод визначення деформації та напруження, що виникають у композитних матеріалів стохастичної структури.

Для аналізу і розрахунку тепломасообмінних та деформаційно-релаксаційних процесів пресування ДСП необхідно мати інформацію про розподіл температурно-вологісних полів й тиску парогазової суміші, ступінь твердіння клею, розмір деформації та напруження з врахуванням структурної анізотропії матеріалу. Такий підхід зумовлює також розробку чисельних алгоритмів і відповідного програмного забезпечення.

Постановка задачі та фізико-математична модель визначення тепломасообмінних і деформаційно-релаксаційних полів. Для визначення динаміки температурного $T(x, y, z, \tau)$; вологісного $U(x, y, z, \tau)$ полів, тиску парогазової суміші $P(x, y, z, \tau)$, ступені твердіння клею $\Theta(x, y, z, \tau)$, компонентів деформацій $\varepsilon_y, \varepsilon_z$ та напруження $\sigma(y, \tau)$ під час пресування деревностружкового пакета, в [4, 5] розглядається об'єм $V = \{0 \leq x \leq b, 0 \leq y \leq 1, 0 \leq z \leq h\}$. На зовнішніх площинах, що паралельні площині пресування $ХОУ$, діє прес із змінним зусиллям $P_{пр}$ (1) та температурою $T_{пр}$. Вважаємо, що осі анізотропії пакета збігаються з геометричними осями координат (рис. 1).

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

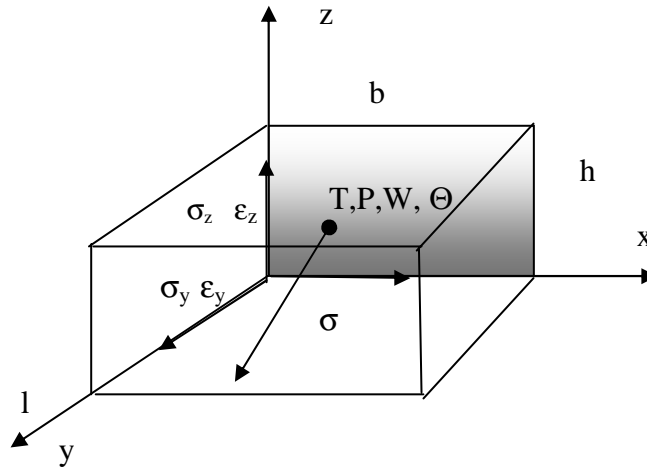


Рис. 1. Схематичне зображення деревно-стружкового пакета:
l – довжина; *b* – ширина; *h* – товщина

Фізико-математична модель можна зобразити такими рівняннями. Рівняння нерозривності для парогазової суміші

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

Рівняння перенесення теплової енергії теплопровідністю і конвективним шляхом із врахуванням фазових переходів і твердіння клею [2, 3, 9]

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

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

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{100}{\rho} \begin{cases} \text{Ш}_1 (P_{\text{пн}} - P)^2; & P \geq P_{\text{пн}}; \\ -\beta_v (P_{\text{пн}} - P) \chi; & P_{\text{пн}} - P_r < P < P_{\text{пн}}; \\ -\text{Ш}_2 \left((P_{\text{пн}} - P - P_r)^2 + \beta_v P_r \right) \chi; & P_{\text{пн}} \geq P_r + P, \end{cases} \quad (4)$$

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

Рівняння твердіння клею

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

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

Коефіцієнти теплоємності, теплопровідності і фільтрації для напрямків анізотропії мають такий вигляд [2]:

$$c(U, T) = \frac{(45U^2 + 195U - 3,9)(1 + 0,0036(T - 298))}{U(100 - 0,048(100U - 6)(T - 298))} 10^3;$$

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

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

$$k_z = (9891,41 - 9,145\rho - 42,05d - 17,67m - 273,3C_c + 5,561T + 31,99\tau + 0,00423\rho^2 + 0,0875pd + 0,0335\rho C_c - 0,00487\rho T + 0,00524\rho\tau + 7,25d^2 + 2,935C_c d + 0,640d\tau - 3728m^2 + 0,617mT + 0,2263m\tau + 3,017C_c^2 - 0,4121C_c T + 0,0906T\tau - 0,574\tau^2) 10^{-7};$$

$$k_x = k_y = (3638,82 - 2,587\rho - 17,11d - 118,15m - 118,47C_c + 8,011T + 16,377\tau + 0,00145\rho^2 + 0,0303\rho d + 0,0109\rho C_c + 0,0017\rho\tau - 0,850C_c d + 0,122Td + 0,212\tau d - 0,839m^2 + 0,167m C_c + 0,156mT + 1,22C_c^2 - 0,148C_c T + 0,035T\tau - 0,295\tau^2) 10^{-7}.$$

Під час пресування в пакеті діють миттєві пружні сили, що виникають в точках пакета з непроклеєною стружкою, в'язкопружні сили, які діють практично в усіх точках, де стружка покрита клеєм, і в ті моменти часу, коли клей є в рідкому або гелеподібному стані. Отже, основним фактором для таких сил є значення температури плити, бо з її зростанням клей твердне і сили в'язкості клею не діють. В'язкопружні сили залежать від вологості стружкового пакета, оскільки із збільшенням вологості збільшується в'язкість та еластичність деревини.

На основі [6] для визначення лінійних деформацій ϵ_y та ϵ_z використано такий підхід. Деформацію доцільно розглядати як ймовірний процес, оскільки в даній точці можлива одна із трьох варіантів деформації: стружкового скелету, або зв'язувача – клею, або стиків – стружковий скелет-клей. Подамо деформацію як математичне очікування (добуток значення величини на ймовірність появи), позначивши деформацію, що не прив'язана до осей, через ϵ , ймовірність появи – p , додавши відповідні індекси.

$$\epsilon = \epsilon_{ст}p_{ст} + \epsilon_{кл}p_{кл} + \epsilon_{сткл}p_{сткл}. \quad (6)$$

Деформацію стружкового скелету та зв'язувача – клею можна обчислити як усереднену (позначення $\langle \rangle$) величину добутків значення приросту температурних та вологісних полів у цей та попередній моменти часу на коефіцієнти температурного та вологісного розширення, а деформацію стиків стружковий скелет – клей, на основі формули Кельвіна–Самільяна [6] як суму впливів на елементарний об'єм.

У формулах $\langle \lambda'' \rangle, \langle \mu'' \rangle, \lambda''_{ст}, \mu''_{ст}, \lambda''_{кл}, \mu''_{кл}$ – постійні Ламе подані як усереднені величини для плити, а також для стружки і клею. Оскільки для розрахунків більш вживаними є модуль пружності E та коефіцієнт Пуассона ν , то доцільно використати такі співвідношення:

$$E = \frac{\mu''(3\lambda'' + 2\mu'')}{\lambda'' + \mu''}; \quad \nu = \frac{\lambda''}{2(\lambda'' + \mu'')}.$$

Деформацію пакета під час пресування на основі (6) визначемо за формулою

$$\epsilon = \frac{(K_{ст} \Delta W + \beta''_{ст} \Delta T) + (K_{кл} \Delta W + \beta''_{кл} \Delta T) \xi_{кл}}{2} + I_v \left[(\beta_1^* - \beta_2^*) \Delta T + (\gamma_1^* - \gamma_2^*) \Delta T \right]. \quad (7)$$

Відповідні величини у (7) визначаються формулами (8)–(21). Зокрема для визначення лінійної деформації вздовж відповідних осей, беруться змінні з відповідними індексами:

$$I_y = \frac{\langle \lambda'' + \mu'' \rangle}{16 \langle \mu'' \rangle \langle \lambda'' + 2\mu'' \rangle} \left[\frac{k''^2(1 + 2k''^2)}{(1 - k''^2)^2} - \frac{k''(1 + 4k''^2)}{(1 - k''^2)^{5/2}} Q \right]; \quad (8)$$

$$I_z = \frac{\langle \lambda'' + \mu'' \rangle}{4 \langle \mu'' \rangle \langle \lambda'' + 2\mu'' \rangle} \left[- \frac{3k''^2}{(1 - k''^2)^2} + \frac{k''(1 + 2k''^2)}{(1 - k''^2)^{3/2}} Q \right]; \quad (9)$$

$$\beta_1^* = \frac{\beta_{\text{CT}}'' + \beta_{\text{КЛ}}''}{2} + \xi_{\text{КЛ}} [d_1(\lambda_{\text{CT}}'' + \mu_{\text{CT}}'' - \lambda_{\text{КЛ}}'' - \mu_{\text{КЛ}}'') + d_2(\lambda_{\text{CT}}'' - \lambda_{\text{КЛ}}'')]; \quad (10)$$

$$\beta_2^* = \frac{\beta_{\text{CT}}'' + \beta_{\text{КЛ}}''}{2} + \xi_{\text{КЛ}} [d_1(\lambda_{\text{CT}}'' - \lambda_{\text{КЛ}}'') + d_2(\lambda_{\text{CT}}'' + 2\mu_{\text{CT}}'' - \lambda_{\text{КЛ}}'' - 2\mu_{\text{КЛ}}'')]; \quad (11)$$

$$\gamma_1^* = \frac{\gamma_{\text{CT}} + \gamma_{\text{КЛ}}}{2} + \xi_{\text{CT}} [d_3(\lambda_{\text{CT}}'' + \mu_{\text{CT}}'' - \lambda_{\text{КЛ}}'' - \mu_{\text{КЛ}}'') + d_4(\lambda_{\text{CT}}'' - \lambda_{\text{КЛ}}'')]; \quad (12)$$

$$\gamma_2^* = \frac{\gamma_{\text{CT}} + \gamma_{\text{КЛ}}}{2} + \xi_{\text{CT}} [d_3(\lambda_{\text{CT}}'' - \lambda_{\text{КЛ}}'') + d_4(\lambda_{\text{CT}}'' + 2\mu_{\text{CT}}'' - \lambda_{\text{КЛ}}'' - 2\mu_{\text{КЛ}}'')]; \quad (13)$$

$$d_1 = \frac{2}{\Delta} \xi_{\text{КЛ}} (\beta_{\text{CT}}'' - \beta_{\text{КЛ}}'') (I - 2\mu' S); \quad (14)$$

$$d_2 = \frac{1}{\Delta} \xi_{\text{КЛ}} (\beta_{\text{CT}}'' - \beta_{\text{КЛ}}'') (2 \cdot I^{\text{oz}} - 2\mu' S); \quad (15)$$

$$d_3 = \frac{2}{\Delta} \xi_{\text{КЛ}} (\gamma_{\text{CT}} - \gamma_{\text{КЛ}}) (I - 2\mu' S); \quad (16)$$

$$d_4 = \frac{1}{\Delta} \xi_{\text{КЛ}} (\gamma_{\text{CT}} - \gamma_{\text{КЛ}}) (2 \cdot I^{\text{oz}} - 2\mu' S); \quad (17)$$

$$I = I^{\text{oy}} + I^{\text{oz}}; S = -2 \cdot I^{\text{oz}^3}; \quad (18)$$

$$\lambda' = (\xi_{\text{КЛ}} - \xi_{\text{CT}}) (\lambda_{\text{CT}}'' - \lambda_{\text{КЛ}}''); \quad (19)$$

$$\mu' = (\xi_{\text{КЛ}} - \xi_{\text{CT}}) (\mu_{\text{CT}}'' - \mu_{\text{КЛ}}''); \quad (20)$$

$$\Delta = 1 - \lambda' (2 \cdot I + 2 \cdot I^{\text{oz}}) - 2\mu' (I - I^{\text{oz}}) + 2\mu' (3\lambda' + 2\mu') S. \quad (21)$$

Зусилля, що діють в кожній точці пакета, визначаються як сума сил пружності та в'язко-пластичних сил, що визначають релаксацію. Миттєві сили пружності визначаються на основі закону Гука. Для моделювання в'язкопластичних сил доцільно використати інтеграл з ядром релаксації, що є експоненційною функцією. Отже, реологічну закономірність деформування деревно-стружкового пакета під час пресування у будь-який момент часу t можна описати залежністю

$$\sigma(t) = \frac{1}{\beta''} (A_1 + A_2) \epsilon(t) + \left[- \int_0^t \frac{1}{\beta''} a' A_1 a^{(t-\tau)} \epsilon(\tau) d\tau - \int_0^t \frac{1}{\beta''} A_2 b' e^{b'(t-\tau)} \epsilon(\tau) d\tau \right]. \quad (22)$$

Реологічні характеристики, які входять в (22), отримано на основі апроксимації експериментальних даних [8]:

$$\beta'' = 0,000741121\rho + 0,01598;$$

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

$$b' = 0,002\rho(-5,62W - 0,003839T + 0,568);$$

$$A_1 = 1,6 e^{0,0041\rho - 9W - 0,007T};$$

$$A_2 = -1,2436 e^{0,00735\rho - 0,174W - 0,05117T}.$$

Для чисельної реалізації задачі визначення тепломасообмінних, деформаційно-релаксаційних полів треба задати початкові та граничні умови, зумовлені особливостями технологічного процесу.

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 пакета на початку пресування:

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z, 0); \quad (23)$$

$$U(x, y, z, 0) = U_0(x, y, z, 0); \quad (24)$$

$$\Theta(x, y, z, 0) = \Theta_0(x, y, z, 0); \sigma(y, \tau) = 0; \epsilon_y = 0; \epsilon_z = 0. \quad (25)$$

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

$$T(x, y, 0, \tau) = T_{\text{пр}} - A_0 e^{-k\sqrt{\tau}}; \quad (26)$$

$$T(x, y, h, \tau) = T_{\text{пр}} - A_0 e^{-k\sqrt{\tau}}. \quad (27)$$

Граничні умови теплообміну на бокових поверхнях характеризують теплообмін із середовищем:

$$\lambda_x \frac{\partial T(0, y, z, \tau)}{\partial x} + \alpha_x (T_c - T(0, y, z, \tau)) = 0; \quad (28)$$

$$\lambda_x \frac{\partial T(b, y, z, \tau)}{\partial x} + \alpha_x (T_c - T(b, y, z, \tau)) = 0; \quad (29)$$

$$\lambda_y \frac{\partial T(x, 0, z, \tau)}{\partial y} + \alpha_y (T_c - T(x, 0, z, \tau)) = 0; \quad (30)$$

$$\lambda_y \frac{\partial T(x, l, z, \tau)}{\partial y} + \alpha_y (T_c - T(x, l, z, \tau)) = 0. \quad (31)$$

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

$$-k'_p \frac{\partial P(x, y, 0, \tau)}{\partial z} + \beta'_p (P_a - P(x, y, 0, \tau)) = 0; \quad (32)$$

$$-k'_p \frac{\partial P(x, y, h, \tau)}{\partial z} + \beta'_p (P_a - P(x, y, h, \tau)) = 0. \quad (33)$$

Граничні умови масоперенесення на бокових поверхнях мають вигляд

$$-k_p \frac{\partial P(0, y, z, \tau)}{\partial x} + \beta_p (P_a - P(0, y, z, \tau)) = 0; \quad (34)$$

$$-k_p \frac{\partial P(b, y, z, \tau)}{\partial x} + \beta_p (P_a - P(b, y, z, \tau)) = 0; \quad (35)$$

$$-k_p \frac{\partial P(x, 0, z, \tau)}{\partial y} + \beta_p (P_a - P(x, 0, z, \tau)) = 0; \quad (36)$$

$$-k_p \frac{\partial P(x, l, z, \tau)}{\partial y} + \beta_p (P_a - P(x, b, z, \tau)) = 0. \quad (37)$$

У цій фізико-математичній моделі введено такі позначення: $c(u, t)$ – питома теплоємність пакета, Дж/кг·°С; $c_{пг}$ – 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_v – густина води, кг/м³; ρ_n – густина пару, кг/м³; ρ – густина пакета, кг/м³; $\rho_{ск}$ – густина скелету, кг/м³; r – питома теплота фазового переходу, Дж/кг; відношення клею в абсолютно сухому стані до маси стружки; P – 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; $P_{пн}$ – тиск насиченої пари, МПа; $P_{пр}$ – тиск пресу (МПа); $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ – коефіцієнти теплообміну вздовж відповідних осей, Вт/м²·°С; Θ_{zc} – ступінь отвердіння зв'язуючого до гелеподібного стану; τ_{zc} – час переходу до гелеподібного стану, с; Θ_k – максимальний ступінь твердіння клею; C_c – концентрація клею; m – кількість затверджувача, %; d – діаметр пори, м; $T_{пр}$ – 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 контактної частини; K_1, K_2 – коефіцієнти пропорційності; θ, ε – експериментально 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; $Ш_1, Ш_2, Ш_\varepsilon$ – параметри функції штрафу; β_v – об'ємний коефіцієнт масообміну, віднесений до різниці масових концентрацій, с/м²; P_a – атмосферний тиск; A_0, k – константи для визначення температури пакета на площині пресування; $\sigma(y, \tau)$ – напруження у деревностружковій плиті, МПа; τ, t – точки на часовій сітці, с; $k''_{ст}$ – коефіцієнт вологісного розширення стружкового скелету, 1/1%; $k''_{кл}$ – коефіцієнт вологісного розширення клею, 1/1%; $\beta''_{ст}$ –

коефіцієнт температурного розширення стружкового скелету, $1/1^{\circ}\text{C}$; $\beta''_{\text{кл}}$ – коефіцієнт температурного розширення клею, $1/1^{\circ}\text{C}$; γ_1^*, γ_2^* – коефіцієнти вологісного розширення плити $1/1\%$; β_1^*, β_2^* – коефіцієнт температурного розширення плити, $1/1^{\circ}\text{C}$; $\xi_{\text{кл}}$ – об'ємний вміст клею у плиті; ΔT – різниця температур в плиті на проміжку часу, $^{\circ}\text{C}$; ΔW – різниця вологості в плиті на проміжку часу; $E_{\text{ст}}$ – модуль Юнга для стружки, МПа; $\nu_{\text{ст}}$ – коефіцієнт Пуассона для стружки; $E_{\text{кл}}$ – модуль Юнга для клею, МПа; $\nu_{\text{кл}}$ – коефіцієнт Пуассона

Для розрахунку тепломасообмінних полів під час пресування деревностружкових плит використано, розроблений авторами, алгоритм та програмну реалізацію даної моделі (1)–(22) з початковими умовами (23)–(25) та граничними умовами (26)–(37) на об'єктно-орієнтованій мові Visual Basic [4]. Вхідні дані є такими: $l = 20$ мм; $b = 20$ мм; $h = 16$ мм, $T_c = 20$ $^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{пр}} = 160$ $^{\circ}\text{C}$; $A_0 = 28$ $^{\circ}\text{C}$; $k = 0,072$; $\rho = 700$ $\text{кг}/\text{м}^3$; $P_a = 0,0165$ МПа; $C_c = 0,54$; $P_0 = 0,0165$ МПа; $\Theta_{zc} = 0,6$; $\Theta_k = 0,9$; $\Theta_0 = 0,4$; $P_{\text{пр}} = 2,7$; $d = 0,005$ м; $r_{01} = r_{02} = r_{03} = 0,003$; $c_{nz} = 2850$ Дж/(кг \cdot $^{\circ}\text{C}$); $\rho_e = 1$ $\text{кг}/\text{м}^3$; $r = 2250000$ Дж/кг; $\Pi = 0,7$; $\mu = 0,11$ Па с; $\nu = 0,02$ $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; $k_0 = 0,098$ м^2 ; $K_1 = 88$, $K_2 = 12,42$; $\varepsilon = 1,5$; $\theta = 0,871$; $m = 0,01$; $M = 0,00047$; $\text{Ш}_1 = 20$; $\text{Ш}_2 = 5$; $\text{Ш}_e = 0,2$; $W_0 = 12$ %; $T_0 = 20$ $^{\circ}\text{C}$; $k''_{\text{ст}} = 0,0023$, $1/1\%$; $k''_{\text{кл}} = 0,0005$, $1/1\%$; $\beta''_{\text{ст}} = 0,0023$, $1/1^{\circ}\text{C}$; $\beta''_{\text{кл}} = 0,0023$, $1/1^{\circ}\text{C}$; $\xi_{\text{кл}} = 0,004$; $E_{\text{ст}} = 280$ МПа; $\nu_{\text{ст}} = 0,504$; $E_{\text{кл}} = 100$ МПа; $\nu_{\text{кл}} = 0,03$.

Чисельна реалізація фізико-математичної моделі. Для розрахунку лінійних деформацій під час пресування деревностружкових плит використано обчислені в [4] для кожної точки просторово-часової сітки значення температурного $T(x, y, z, \tau)$ і вологісного $U(x, y, z, \tau)$ полів. На основі моделі розроблено програму мовою Visual Basic for Application, що визначає ε_y та ε_z , $\sigma(t)$ в кожній точці просторово-часової сітки. Результати розрахунку подано на графіках.

Значення отриманих результатів суттєво залежить від зміни зусилля пресу. У разі наростання зусилля відбувається прогрівання пакета (рис. 2) і збільшення вологості на торцях за рахунок інтенсивного випаровування води в центрі пакета і руху парогазової суміші до країв (рис. 3). Напруження і зв'язана з нею деформація (рис. 4, 5, б) зменшуються із тривалістю дії пресу, оскільки збільшення вологості сприяє зростанню пластичності стружкового скелету. Уже на цьому проміжку часу спостерігається дія в'язких сил, що виникають у проклеєній стружці та ослаблюють дію пружних сил.

В період, коли плити зімкнулись і займають стаціонарне положення (час 60–120 с), діють процеси релаксації (зменшення напруження при незмінній деформації). Різниця між деформаціями в кожній точці часу цього проміжку менша 0,001 (рис. 4), а напруження різко зменшується. В цей час домінують сили в'язкості, оскільки клей переходить в гелеподібний стан і твердіє, що суттєво ослаблює сили пружності. Після розкриття плит пресу вологість пакета різко падає, в цей час напруження можуть виникати за рахунок всихання деревностружкового пакета за товщиною.

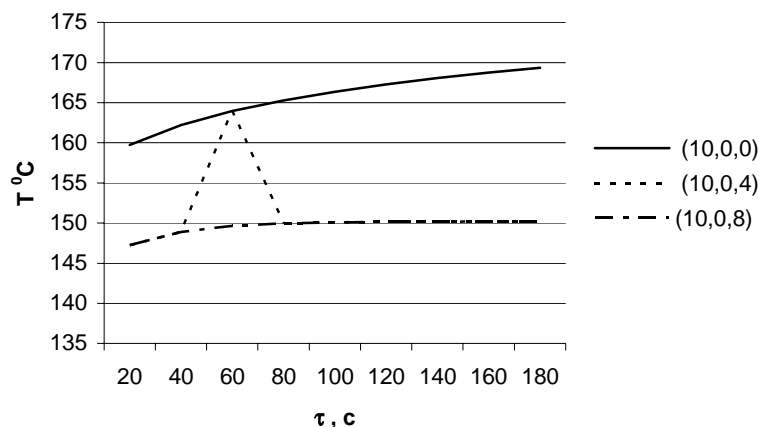


Рис. 2. Розподіл температури на торці (площина OZ) пакета

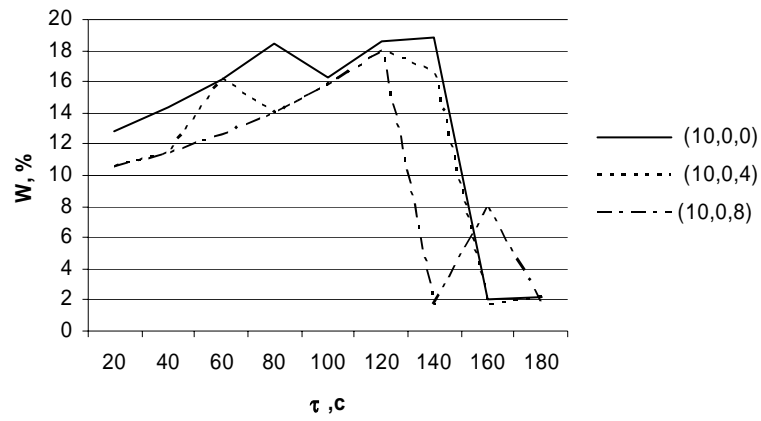


Рис. 3. Розподіл вологості на торці (площина OZ) пакета

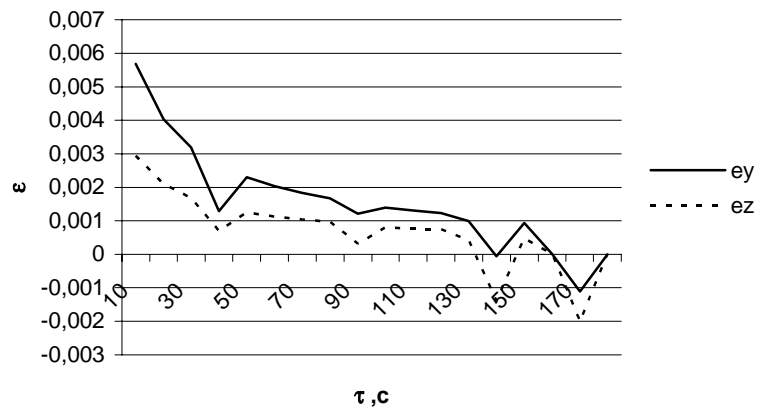


Рис. 4. Деформація пакета в точці (10,0,0)

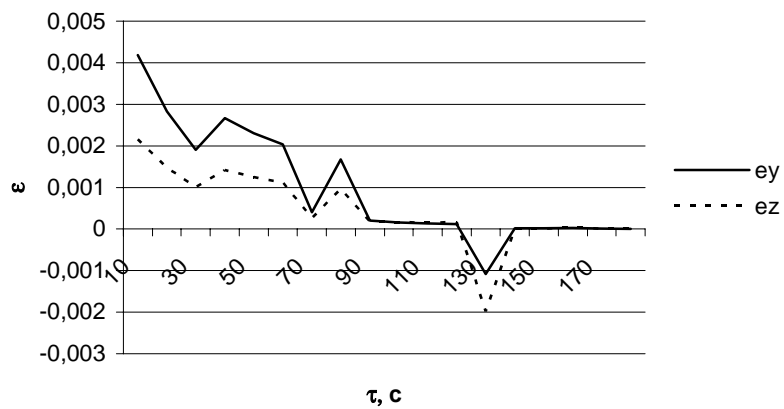


Рис. 5. Деформація пакета в точці (10,0,8)

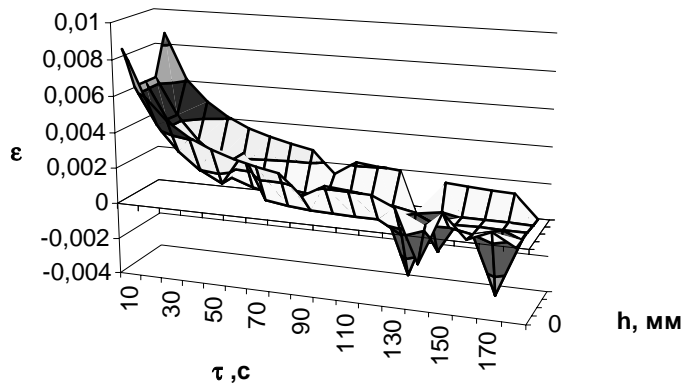


Рис. 6. Зміна деформації на торці

Ця модель може мати практичне застосування для розробки радіальних діаграм пресування деревностружкових плит на основі регулювання швидкості релаксації напружено-деформаційного стану матеріалу. Це дасть можливість вдосконалити технологічний процес та покращити якість продукції.

1. Бехта П.А. Технологічні розрахунки у виробництві ДСП. – К: ІСДО, 1994. – С. 156. 2. Обливин А.Н. Тепло- и массоперенос в производстве древесностружечных плит. – М.: Лесн. пром-сть, 1978. – С. 191. 3. Отлев И.А. Интенсификация производства древесностружечных плит. – М. Лесн. пром-сть. – 1989. – С. 191. 4. Соколовський Я.І., Петрів О.М. Чисельне моделювання нестационарних полів тепломасоперенесення в процесі пресування деревностружкових плит // Наук. вісн. УкрДЛТУ: Зб. наук.-техн. пр. – Львів: УкрДЛТУ, 2004. – Вип. 3. – С. 57–59. 5. Соколовський Я.І., Петрів О.М. Визначення впливу технологічних факторів на тепломасоперенесення в процесі пресування деревностружкових плит // Наук. вісн. УкрДЛТУ: Зб. наук.-техн. пр. – Львів: УкрДЛТУ, 2004. – Вип. 14. – 7. – С. 76–83. 6. Хорошун Л.П., Щербаков А.С. Прочность и деформативность арболита. – К.: Наукова думка, 1979. – 190 с. 7. Humphrey P.F., Bolton A.J. The hot pressing of dry-formed Wood-based composites. A simulation model for heat and moisture transfer // Holzforschung. – 1989. – 43. – № 3. – P. 199-206. 8. 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. 9. Соснин М.И., Климова М.И. Физические основы прессования древесностружечных плит. – Новосибирск: Наука, 1981. – 190 с.