

## ВПЛИВ ПОЧАТКОВОЇ ВОЛОГОСТІ НА ДЕФОРМАЦІЙНО-РЕЛАКСАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ В ДЕРЕВНОСТРУЖКОВІЙ ПЛИТІ ПІД ЧАС ПРЕСУВАННЯ

© Соколовський Я.І., Петрів О.М., 2007

Наведено залежності для визначення напруження та деформації під час пресування деревностружкового пакета для змінної дії преса. Проведено числовий експеримент та проаналізовано вплив початкової вологості на напруження та деформацію в різні етапи дії преса.

The dependence for definition of stresses and deformations under pressing of particleboards for variable action of press. Realization numerical experiment and influences initial moisture on stress and deformation was analysed at different stages of press action.

**Постановка проблеми.** Вдосконалення та впровадження енергоощадних технологій на підприємствах деревообробної галузі є однією з головних умов успішного формування суспільства сталого розвитку. У вирішенні цієї проблеми значну роль відіграє розробка нових та вдосконалення існуючих технологій виготовлення деревних композиційних матеріалів. У виготовленні деревностружкових плит (ДСП) визначальною є операція пресування, яка істотно впливає на якість плити, та є найбільш енергомісткою. Процеси, що перебігають у деревних композитних матеріалах, зокрема в ДСП, під час пресування у гарячих пресах характеризуються складністю взаємопов'язаних, різних за характером, фізико-механічних і хімічних величин та фазових перетворень і істотно залежать від початкової вологи, густини та структури плити. Отже, для аналізу і розрахунку технологічних процесів пресування ДСП, прогнозування фізико-механічних властивостей ДСП необхідно мати залежності, які пов'язували б деформацію та напруження в плиті під час пресування із її початковими параметрами.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Розробку моделей деформаційно-релаксаційних процесів розглядає низка досліджень [1, 4, 8], в яких подано залежності для визначення напружено-деформованого стану, проте вони стосуються переважно пружної області і є емпіричними або напівемпіричними [8] та не враховують релаксаційних процесів, що відбуваються в плиті під час пресування.

Нижче запропоновано залежності з урахуванням релаксації для розрахунку напруження та деформацій зсуву і розтягу.

**Мета роботи** – визначити вплив початкових параметрів плити, зокрема її початкової вологості, на деформаційно-релаксаційні процеси, що відбуваються в плиті під час її пресування, та показати можливість використання отриманих результатів для раціоналізації процесу виготовлення деревностружкових плит.

**Вплив початкової вологості на деформаційно-релаксаційні процеси в деревностружковій плиті під час пресування.** Процес пресування ДСП супроводжується випаровуванням вільної та зв'язаної вологи, фізичні поля яких описуються процесом тепломасоперенесення. Для аналізу впливу початкової вологості  $W_0$  деревностружкового пакета на масоперенесення та деформаційно-релаксаційні процеси, що відбуваються в матеріалі під час пресування, використана фізико-математична модель [1, 2] процесу тепломасоперенесення та твердіння в'язучого. В результаті числової реалізації моделі [1, 2] отримано значення температури  $T$ , тиску  $P$ , вологості  $W$  в кожній точці часової та просторової сітки, якою покрито пакет.

Для моделювання деформаційно-релаксаційних процесів використовувався такий підхід. Під час пресування в плиті діють пружні, в'язко-пружні сили, що виникають в точках пакета з непоклеєною стружкою, і в усіх точках, де стружка покрита клеєм.

Для визначення лінійних деформацій розглядається пакет як трансверсально-ізотропне тіло, в якому під дією температури  $T$ , тиску  $P$  та змінної вологості  $W$  виникають поздовжні  $\varepsilon_y$  та поперечні  $\varepsilon_z$  деформації.

На основі [4] деформацію доцільно розглядати як ймовірний процес, оскільки у цій точці можливий один із трьох варіантів деформації: стружки, клею або стиків – стружка-клей. Отже, представимо деформацію  $\varepsilon$  як математичне очікування. Ймовірність появи дорівнює  $p$ . Тоді, додавши відповідні індекси, усереднена деформація пакета дорівнюватиме

$$\langle \varepsilon \rangle = \varepsilon_{cm} p_{cm} + \varepsilon_{кл} p_{кл} + \varepsilon_{cmккл} p_{cmккл} \quad (1)$$

Деформацію деревної стружки можна обчислити як усереднену (позначення  $\langle \rangle$ ) величину добутку значення приросту температурних та вологісних полів на коефіцієнт температурного і вологісного розширення. Деформацію клею подамо як добуток зміни вологісних та температурних полів у цей та попередній моменти часу на коефіцієнт вологісного та температурного розширення і на об'ємний вміст клею, а деформацію стиків стружка-клей визначимо на основі формули Кельвіна–Самільяна [4] як суму впливів, що діють на елементарний об'єм:

$$\varepsilon^f = \langle \varepsilon \rangle + K^{(1,2)} * p_{ff} (\lambda^{0f} \varepsilon^f p_{cc} - \lambda^{0c} \varepsilon^c - (\beta^f - \beta^c) \Delta T - (\gamma^f - \gamma^c) \Delta W) \quad (2)$$

Інтегральний оператор  $K^{(1,2)}$  діє за правилом

$$K^{(1,2)} * \varphi^{(2)}(x) = \int U_{n(j,k)q} (x^1 - x^2) \varphi^{(2)} dV^{(2)} + \int U_{n(j,k)} (x^1 - x^2) \varphi^{(2)} \cos(n, x_q^{(2)}) dS^{(2)}, \quad (3)$$

де  $S$  – гранична поверхня об'єму, що займає матеріал;  $n$  – зовнішня нормаль до поверхні  $S$ . Функція  $U_{n(j,k)}$  – це тензорна функція впливів Кельвіна–Самільяно, що визначається за формулою

$$U_{j,k}(x) = \frac{12(\lambda'' + \mu'')}{16\pi\mu''(\lambda'' + 2\mu'')R''} \left[ \frac{\lambda'' + 3\mu''}{\lambda'' + \mu''} + \frac{x_j - x_k}{R''^2} \right], \quad (4)$$

де  $\lambda''$ ,  $\mu''$  – сталі Ламе;  $R''$  – відстань між елементарними точками  $x^{(1)}$  та  $x^{(2)}$  в об'ємі плити. Крім того, у формулі (2) використовувались такі позначення:  $\langle \varepsilon \rangle$  – математичне очікування деформації матеріалу;  $p_{ff}$  – ймовірність знаходження деревної стружки в точці, тобто  $x^{(1)}$  та  $x^{(2)}$  знаходяться в об'ємі стружки;  $p_{cc}$  – ймовірність знаходження клею в точці ( $x^{(1)}$  та  $x^{(2)}$  знаходяться на об'ємі клею);  $p_{cf}$  – ймовірність знаходження в точці стику ( $x^{(1)}$  знаходиться в об'ємі клею, а  $x^{(2)}$  – в об'ємі стружки);  $\lambda^{0c}$  – пружні модулі деревини;  $\lambda^{0f}$  – пружні модулі клею;  $\beta''_{ст}$  – температурні характеристики деревини (стружки);  $\beta''_{кл}$  – температурні характеристики клею;  $\Delta T$  – різниця температури плити в точці за проміжок часу;  $\Delta W$  – різниця вологості плити в точці за проміжок часу;  $k''_{ст}$ ,  $k''_{кл}$  – коефіцієнти вологісного розширення деревини та клею.

Для визначення усередненої деформації  $\langle \varepsilon \rangle$  приймемо, що пружні сили на стику деревна стружка-клей є нескінченно малими, а коефіцієнти  $\lambda^{0f}$  та  $\lambda^{0c}$  дорівнюють нулеві.

Деформація пакета під час пресування на основі (2) визначиться за формулою

$$\varepsilon = \frac{(k''_{cm} \Delta W + \beta''_{cm} \Delta T) + (k''_{кл} \Delta W + \beta''_{кл} \Delta T) \xi_{кл}}{2} + I_v \left[ (\beta_1^* - \beta_2^*) \Delta T + (\gamma_1^* - \gamma_2^*) \Delta W \right]. \quad (5)$$

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

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

У конкретних розрахунках  $\lambda''$ ,  $\mu''$ ,  $\lambda''_{ст}$ ,  $\mu''_{ст}$ ,  $\lambda''_{кл}$ ,  $\mu''_{кл}$  визначаються через модуль Юнга для плити, стружки, клею  $E$ ,  $E_{ст}$ ,  $E_{кл}$ , МПа і коефіцієнти Пуассона для плити, стружки та клею  $\nu$ ,  $\nu_{ст}$ ,  $\nu_{кл}$ .

Відповідні величини у (5) визначаються за такими формулами:

$$I_y = \frac{\langle \lambda'' + \mu'' \rangle}{16 \langle \mu'' \rangle \langle \lambda'' + 2\mu'' \rangle} \left[ \frac{k''^2(1 + 2k''^2)}{(1 - k''^2)^2} - \frac{k''(1 + 4k''^2)}{(1 - k''^2)^{5/2}} Q \right]; \quad (6)$$

$$I_z = \frac{\langle \lambda'' + \mu'' \rangle}{4 \langle \mu'' \rangle \langle \lambda'' + 2\mu'' \rangle} \left[ -\frac{3k''^2}{(1 - k''^2)^2} + \frac{k''(1 + 2k''^2)}{(1 - k''^2)^{5/2}} Q \right]; \quad (7)$$

$$\beta_1^* = \frac{\beta''_{cm} + \beta''_{кл}}{2} + \xi_{кл} [d_1(\lambda''_{cm} + \mu''_{cm} - \lambda''_{кл} - \mu''_{кл}) + d_2(\lambda''_{cm} - \lambda''_{кл})]; \quad (8)$$

$$\beta_2^* = \frac{\beta''_{cm} + \beta''_{кл}}{2} + \xi_{кл} [d_1(\lambda''_{cm} - \lambda''_{кл}) + d_2(\lambda''_{cm} + 2\mu''_{cm} - \lambda''_{кл} - 2\mu''_{кл})]; \quad (9)$$

$$\gamma_1^* = \frac{\gamma_{cm} + \gamma_{кл}}{2} + \xi_{cm} [d_3(\lambda''_{cm} + \mu''_{cm} - \lambda''_{кл} - \mu''_{кл}) + d_4(\lambda''_{cm} - \lambda''_{кл})]; \quad (10)$$

$$\gamma_2^* = \frac{\gamma_{cm} + \gamma_{кл}}{2} + \xi_{cm} [d_3(\lambda''_{cm} - \lambda''_{кл}) + d_4(\lambda''_{cm} + 2\mu''_{cm} - \lambda''_{кл} - 2\mu''_{кл})]; \quad (11)$$

$$d_1 = \frac{2}{\Delta} \xi_{кл} (\beta''_{cm} - \beta''_{кл})(I - 2\mu'S); \quad (12)$$

$$d_2 = \frac{1}{\Delta} \xi_{кл} (\beta''_{cm} - \beta''_{кл})(2 \cdot I_z - 2\mu'S); \quad (13)$$

$$d_3 = \frac{2}{\Delta} \xi_{кл} (\gamma_{cm} - \gamma_{кл})(I - 2\mu'S); \quad (14)$$

$$d_4 = \frac{1}{\Delta} \xi_{кл} (\gamma_{cm} - \gamma_{кл})(2 \cdot I_z - 2\mu'S); \quad (15)$$

$$I = I_y + I_z; \quad S = -2 \cdot I_z^3; \quad (16)$$

$$\lambda' = (\xi_{кл} - \xi_{cm})(\lambda''_{cm} - \lambda''_{кл}); \quad Q = \ln(k'' - \sqrt{1 - k''^2}) \quad (17)$$

$$\mu' = (\xi_{кл} - \xi_{cm})(\mu''_{cm} - \mu''_{кл}); \quad (18)$$

$$\Delta = 1 - \lambda'(2 \cdot I + 2 \cdot I_z) - 2\mu'(I - I_z) + 2\mu'(3\lambda' + 2\mu')S, \quad (19)$$

де  $\gamma_1^*, \gamma_2^*$  – коефіцієнти вологісного розширення плити;  $\beta_1^*, \beta_2^*$  – коефіцієнт температурного розширення плити;  $k''$  – відношення півосей у фракційному складі стружки.

Зусилля, що діють в кожній точці пакета, визначаються як сума сил пружності та в'язко-пружних сил, що визначають процес релаксації. Миттєві сили пружності визначаються на основі закону Гука. Для моделювання в'язко-пружних сил доцільно використати інтеграл з ядром релаксації, що є експоненційною функцією. Тоді реологічну закономірність деформування дерево-стружкового пакета у процесі пресування у будь-який момент часу  $\tau$  можна описати залежністю

$$\sigma(t) = \frac{1}{\beta''} (A_1 + A_2) \varepsilon_y(t) + \left[ -\int_0^t \frac{1}{\beta''} a' A_1 e^{-a'(t-\tau)} \varepsilon_y(\tau) d\tau - \int_0^t \frac{1}{\beta''} A_2 b' e^{-b'(t-\tau)} \varepsilon_y(\tau) d\tau \right]. \quad (20)$$

У залежності (20) перший додаток визначає пружні сили, а другий – процес релаксації. Реологічні характеристики, які входять в (20), отримано на основі апроксимації експериментальних даних [8]:

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

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

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

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

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

де  $\rho$  – густина плити.

Отже, рівняння (20) визначає зв'язок напружено-деформаційного стану з основними її технологічними характеристиками, а саме – температурою, вологістю та густиною плити.

**Аналіз результатів числового експерименту.** Визначення впливу початкової вологості плити на масоперенесення та деформаційно-релаксаційні процеси. На основі математичної моделі [2] було проведено числові експерименти з такими початковими умовами. Температура плит преса  $T_{пр}=190$  °С, початкова вологість ( $W$ ) приймала два значення  $W=8$  % та  $W=12$  %, тиск преса  $P_{пр}$  проміжку часу пресування змінювався в такий спосіб: 0–60 с наростаюча дія преса, на проміжку часу 60–420 с тиск преса  $P_{пр}$  сталий і такий, що дорівнює 2,5 МПа, 420–600 с – послаблення і зняття дії преса.

Оскільки процес прогрівання плити супроводжується випаровуванням, то його доцільно розбити на три фази [8]:

- 1) фазу інтенсивного випаровування вологи;
- 2) фазу кипіння;
- 3) фазу перегрівання.

За цих початкових умов фаза інтенсивного випаровування настає вже на перших секундах зімкнення плит преса. Про це свідчить наростання тиску парогазової суміші на поверхні пакета (рис. 1).

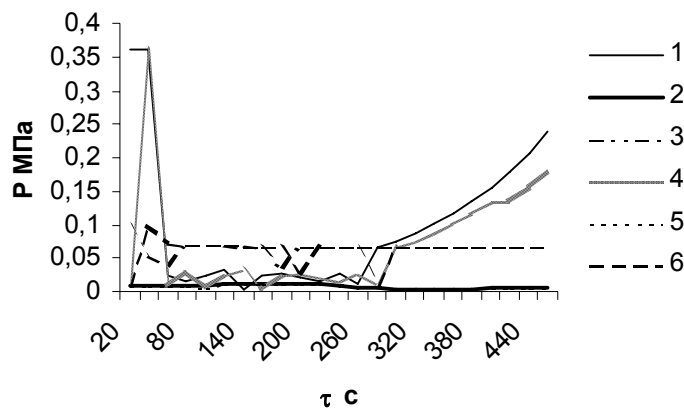


Рис. 1. Розподіл тиску парогазової суміші під час пресування в деревностружковій плиті:

- 1 – площина пресування; 2 – торець плити; 3 – центр плити,  $W_0=8$  %;  
4 – площина пресування; 5 – торець плити; 6 – центр плити,  $W_0=12$  %

Причому інтенсивне зростання спостерігається для плит з більшою вологістю. Різке зростання вологості на поверхні плити дає підставу твердити, що випаровується не тільки вільна, але й зв'язана волога, а це, своєю чергою, вказує на початок фази кипіння (приблизно на 100 с часу пресування). Далі під час пресування відбувається зменшення тиску на поверхні плити, а також одночасно зростає тиск на торцях плити. Зокрема величина тиску для плит з більшою вологістю є вищою. У цей період часу тиск всередині плити зростає, що вказує на переміщення фронту кипіння всередину плити. Величина тиску для парогазової суміші в центрі плити для обох випадків є приблизно однаковою (рис. 1) і не залежить від початкової вологості плити. Доцільно припустити, що надлишкова парогазова суміш виводиться через торці, про що свідчить пульсуючий характер тиску та збільшення його величини на торцях для плит із більшою початковою вологістю (рис. 1).

Наступний період часу пресування (після 300 с) характеризується стабілізацією тиску на поверхні і в центрі плити, а це дає змогу припустити, що процес випаровування закінчився, і на цьому етапі водяна пара, що заповнила всі пори плити, знаходиться в перегрітому стані. Збільшення вологості в центрі плити можна пов'язати з поглинанням частини вологи деревними стружками плити (рис. 2).

Цей стан триває до завершення процесу пресування. При розімкненні плит преса різко зростає тиск і вологість на поверхні плити, оскільки висушені приповерхневі шари стають

провідниками для відведення парогазової суміші. У цей момент різко зростає тиск на торцях, проте він приблизно однаковий і не залежить від початкової вологості. Це є підтвердженням припущення, що частина парогазової суміші через торці і проміжки між пресом і плитою виводиться із плити в зовнішнє середовище, а в плиті залишається лише та частина пари, що заповнила вільні пори. Отже, зменшення тиску парогазової суміші під час пресування за рахунок зменшення початкової вологості не завжди виправдане. Доцільно пов'язувати цей процес і з фільтраційними властивостями плити, які характеризуються фракційним складом матеріалу.

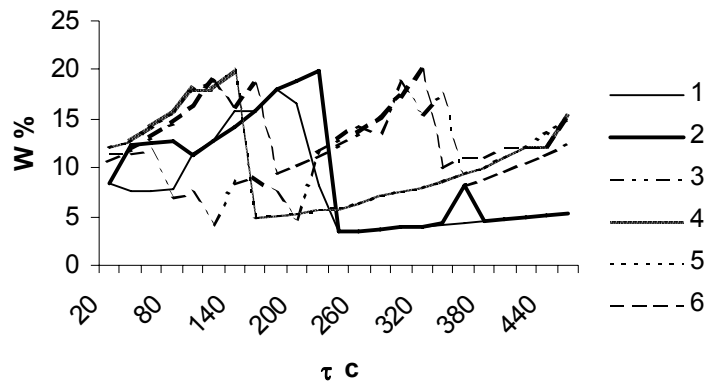


Рис. 2. Розподіл вологості під час пресування в деревностружковій плиті:  
 1 – площина пресування; 2 – торець плити; 3 – центр плити,  $W_0=8\%$ ;  
 4 – площина пресування; 5 – торець плити; 6 – центр плити,  $W_0=12\%$

Другим етапом дослідження було визначення впливу масоперенесення на деформаційно-релаксаційний стан плити. Основні деформації виникають під час пресування і зумовлюють виникнення значного напруження на поверхні плити (рис. 3).

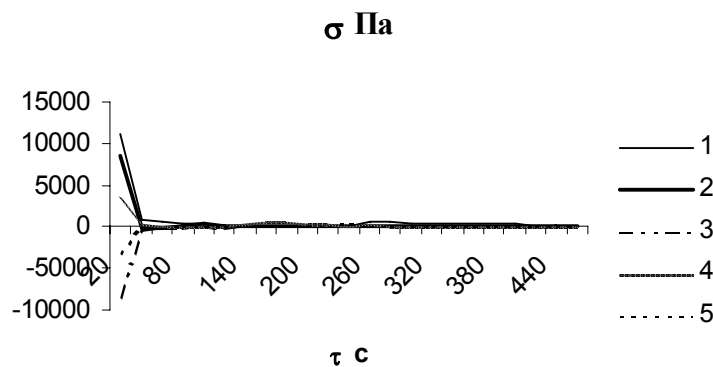


Рис. 3. Зміна напружень в деревностружковій плиті:  
 1 – площина пресування; 2 – торець плити; 3 – центр плити,  $W_0 = 8\%$ ;  
 4 – площина пресування; 5 – торець плити,  $W_0 = 12\%$

Ці напруження можна пов'язати із зміною температурно-вологісного поля плити, а також з її в'язко-пружними властивостями. У плитах з меншою вологістю це напруження більше (рис. 3), оскільки ці сили виникають за рахунок опору непроклеєної частини деревної стружки, а стружка з меншою вологістю є менш пластичною порівняно із більш вологою. Вологіша стружка чинить менший опір за зміни форми, а отже, виникає менше напруження. Аналогічно можна пояснити зменшення напруження на пласті в плитах із більшою вологістю (рис. 3). Якщо проаналізувати деформацію на пласті деревностружкового пакета (рис. 4), то зміна вологості (рис. 2) викликає відповідні деформації – зменшення вологості спричиняє всихання плити (від'ємні деформації),

збільшення – розбухання (додатні деформації). За послаблення і зняття дії преса спостерігається незначне розпресування і збільшення напруження, які пов'язані з в'язкопружними властивостями матеріалу Ці напруження є значно меншими, ніж тиск парогазової суміші.

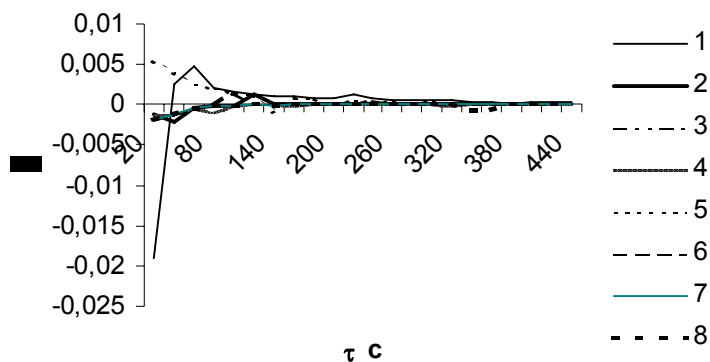


Рис. 4. Динаміка деформаційних процесів в пресованій плиті:

- 1 – деформація зсуву на площині пресування; 2 – деформація зсуву на торці плити;  
 3 – деформація зсуву в центрі плити,  $W_0 = 8\%$ ; 4 – деформація розтягу,  $W_0 = 8\%$ ;  
 5 – деформація зсуву на площині пресування; 6 – деформація зсуву на торці плити;  
 7 – деформація зсуву в центрі плити,  $W_0 = 12\%$ ; 8 – деформація розтягу,  $W_0 = 12\%$

Підвівши підсумки числового експерименту, можна зробити висновок: збільшення початкової вологості плити сприяє зменшенню напруження в плиті, проте величину початкової вологості слід пов'язувати із структурою плити, а власне – із величиною фракції і діаметром пори, оскільки фільтраційні можливості плити повинні вивести частину парогазової суміші із плити, щоб уникнути росту тиску всередині плити, який призведе до руйнування клейових з'єднань, що, своєю чергою, і зменшить міцність плити.

**Висновки.** Використовуючи фізико-математичну модель тепломасоперенесення і залежності для визначення деформацій і напруження, можна для заданих технологічних параметрів, зокрема вологості і фракційності, прогнозувати величини тиску парогазової суміші, деформації і напруження в заданих точках пакета. Такий підхід дає змогу підбирати технологічні параметри, які дають можливість оптимізувати процес пресування і випускати деревностружкову плиту високої якості.

1. Соколовський Я.І., Петрів О.М. Чисельне моделювання тепломасообмінних і деформаційно-релаксаційних полів під час пресування деревностружкових плит // Вісн. 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 // Наук. вісник УкрДЛТУ: Зб. наук.-техн. праць. – Львів: УкрДЛТУ, 2004. – Вип. 14.4. – С. 57–59. 3. Соколовський Я.І., Петрів О.М. Визначення впливу технологічних факторів на тепломасоперенесення в процесі пресування деревностружкових плит // Наук. вісник УкрДЛТУ: Зб. наук.-техн. праць. – Львів: УкрДЛТУ, 2004. – Вип. 14.7. – С. 76–83. 4. Хорошун Л.П., Щербаков А.С. Прочність и деформативность арболита. – К.: Наук. думка, 1979. – 190 с. 5. Бехта П.А. Технологічні розрахунки у виробництві ДСП. – К.: ІСДО, 1994. – 156 с. 6. Петрів О.М. Результати експериментальних досліджень нестационарних температурних полів у процесі пресування деревностружкових плит // Наук. вісник УкрДЛТУ: Зб. наук.-техн. праць. – Львів: УкрДЛТУ, 2005. – Вип. 15.3. – С. 152–157. 7. Обливин А.Н. Тепло- и массоперенос в производстве древесностружечных плит. – М.: Лесн. пром-сть, 1978. – 191 с. 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 Endlosrpressen. – Universität Hamburg, 1999. 9. Ганцюк В.М. Інтенсифікація процесу пресування ДСП в установках безперервної дії: Автореф. дис. ...канд. техн. наук. – Львів: УкрДЛТУ, 1996. – 18 с.