

8. РЕСУРСООЩАДНІ ТА ЕКОЛОГОБЕЗПЕЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЕРЕВООБРОБКИ



Наукові праці Лісівничої академії наук України
Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine

<http://fasu.nltu.edu.ua>
<https://doi.org/10.15421/411833>
Article received 2018.07.24
Article accepted 2018.10.25

ISSN 1991-606X print
ISSN 2616-5015 online
@ ✉ Correspondence author
Pavlo Bekhta
bekhta@ukr.net

General Chuprynka st., 103, Lviv, 79057, Ukraine

УДК 674.815

Математична модель процесу пресування легких стружкових плит із вмістом пінополістиролу

П. А. Бехта¹, Л. Р. Байзова²

Запропоновано математичну модель процесу пресування легких стружкових плит із різним вмістом пінополістиролу, яка поєднує фізичні властивості компонентів стружково-полімерного пакета, готової личкованої луценням шпоном легкої стружкової плити із вмістом пінополістиролу та параметри режиму пресування. На основі математичної моделі розраховано тривалість прогрівання стружково-полімерного пакета до 100°C залежно від температури плит преса, щільності готових плит і вмісту в них пінополістиролу. Встановлено, що зі збільшенням щільності плит від 350 кг/м³ до 550 кг/м³ тривалість прогрівання середини стружково-полімерного пакета до 100°C збільшується на 10% за однакових значень вмісту пінополістиролу в плиті та температур пресування. Наявність пінополістиролу в стружково-полімерному пакеті спричиняє збільшення тривалості прогрівання його середини до 100°C. Це зростання становить 3, 7 і 9% за вмісту пінополістиролу в плиті відповідно 4, 7 і 10%, порівняно із плитами без вмісту пінополістиролу. Збільшення температури пресування від 180 до 200°C зменшує тривалість прогрівання середини стружково-полімерного пакета до температури 100°C на 12% за однакових щільностей готової плити і значень вмісту пінополістиролу в ній. Розраховані за моделлю значення тривалості прогрівання середини пакета без пінополістиролу до температури 100°C збігаються з рекомендованими в літературі значеннями тривалості прогрівання стружкових плит. Для стружково-полімерного пакета з пінополістиролом отриману модель апробовано експериментально. Значення теоретичної та експериментальної залежностей є близькими, що підтверджує адекватність розробленої моделі.

Ключові слова: легкі стружкові плити; пінополістирол; луцений шпон; деревинна стружка; карбамідоформальдегідний клей; теплопровідність; градієнт температури; питома витрата теплоти; питома теплоємність; температурний інтервал прогрівання; математична модель.

¹ Бехта Павло Антонович – академік Лісівничої академії наук України, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу. Національний лісотехнічний університет України, вул. генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: 032-238-44-99, E-mail: bekhta@ukr.net

² Байзова Любов Русланівна – аспірант кафедри технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу. Національний лісотехнічний університет України, вул. генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: 032-238-44-99, +38-093-622-18-08. E-mail: kozak_l@nltu.edu.ua

Вступ. Гаряче пресування легких стружкових плит із вмістом пінополістиролу характеризується декількома фізико-хіміко-механічними явищами, що роблять цю операцію досить складною. Серед основних є тепло- і масообмінні процеси, поліконденсація клею, реологічні явища. Через множинність і взаємозалежність цих явищ розробка математичних моделей, які описували б цю операцію, має велике значення, тому що дає розуміння взаємодії операційних параметрів і їх впливу на властивості плит, на затрати енергії та часу.

Процес гарячого пресування стружкових плит і тривалість їх пресування визначаються насамперед зміною температури у середньому шарі стружкового пакета. Саме за досягнення в середині пакета значень температури 100 °C фізико-хімічні процеси структуроутворення плит відбуватимуться найінтенсивніше (Bekhta, 1994a, 2004). Тому знання про тривалість прогрівання стружково-полімерного пакета є дуже важливими для отримання плит задовільної якості та раціонального використання енергетичних ресурсів.

Починаючи з вісімдесятих років XX ст., у літературі було подано ряд моделей, в яких автори намагалися описати явища під час пресування деревинних композиційних матеріалів (Harless et al., 1987, Humphrey & Bolton, 1989, Hata et al., 1990, Kamke & Wolcott, 1991, Suo & Bowyer, 1994, Hubert & Dai, 1998, Carvalho & Costa, 1998, Haselein, 1998, Thoemen & Humprey, 1999, 2001, 2003, Dai et al., 2000, Thoemen, 2000, Zombori, 2001, Zombori et al., 2003, Carvalho et al., 2001, 2003, Gupta et al., 2005, 2006a, 2006b, 2006c, Pereira et al., 2006). Усі вони мають свій внесок у розуміння цього процесу для конкретного композиційного матеріалу. Зокрема, моделі (Harless et al., 1987, Humphrey & Bolton, 1989, Hata et al., 1990, Kamke & Wolcott, 1991, Suo & Bowyer, 1994, Hubert & Dai, 1998, Thoemen & Humprey, 1999, 2001, 2003, Dai et al., 2000, Zombori, 2001, Zombori et al., 2003) розглядають фізичні механізми під час гарячого пресування стружкових плит та OSB, а в літературі (Carvalho & Costa, 1998, Haselein, 1998, Thoemen, 2000, Carvalho et al., 2001, 2003, Gupta et al., 2005, 2006a, 2006b, 2006c, Pereira et al., 2006) – пресування MDF. Однак даних про моделювання процесу пресування легких стружкових плит із вмістом пінополістиролу і, зокрема тривалості прогрівання стружково-полімерного пакета, немає. Отже, тривалість прогрівання стружково-полімерного пакета потребує додаткових досліджень.

Мета дослідження – розробити математичну модель процесу пресування легких стружкових плит із вмістом пінополістиролу та на її основі встановити тривалість прогрівання стружково-полімерного пакета залежно від температури плит преса, щільності готових плит і вмісту в них пінополістиролу.

Розроблення моделі. Тривалість прогрівання середнього шару плити до температури початку поліконденсації клею і випаровування вологи залежить від теплопровідності сировини і матеріалів, з яких плита складається (Ozarkiv et al., 1997).

Якщо припустити, що стружково-полімерний пакет має вигляд пластини (рис. 1), яка розташована між нагрітими до певної температури ($t_{n.ш.}$) плитами преса, то згідно з відомим законом теплопровідності Фур'є, величина теплового потоку (dQ) прямо пропорційна коефіцієнту теплопровідності (λ), градієнту температури ($\frac{dt}{dx}$) та площі поверхні матеріалу (F). Математично це можна записати так (Ozarkiv et al., 1997, Biley, 2005, Biley et al., 2012):

$$\frac{dQ}{d\tau_{np}} = -\lambda \cdot F \cdot \frac{dt}{dx}. \quad (1)$$

Температурний інтервал прогрівання стружково-полімерного пакета можна визначити як:

$$dt = t_{c.ш.} - t_{n.ш.}, \quad (2)$$

де $t_{n.ш.}$ – температура поверхневого шару стружково-полімерного пакета (можна прийняти за температуру плит преса – $t_{n.пл.}$), °C;

$t_{c.ш.}$ – температура середнього шару стружково-полімерного пакета (можна прийняти за температуру середовища), °C.

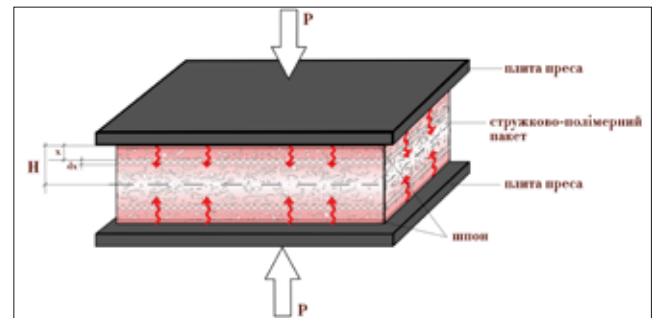


Рис. 1. Схематичне зображення стружково-полімерного пакета між плитами преса

З іншого боку, протягом певного часу ($d\tau$) відбувається прогрівання матеріалу на певну глибину (dx), а кількість теплоти, яка затрачається на прогрівання матеріалу до відповідної глибини, визначають як [Ozarkiv et al., 1997, Biley, 2005, Biley et al., 2012):

$$\frac{dQ}{d\tau_{np}} = q_n \cdot F \cdot \frac{dx}{d\tau_{np}}, \quad (3)$$

де q_n – питома витрата теплоти на нагрівання одиниці об'єму стружково-полімерного пакета, Дж/м³.

Прирівнявши рівняння (1) та (3), отримаємо:

$$\lambda \cdot F \cdot \frac{t_{n.ш.} - t_{c.ш.}}{dx} = q_n \cdot F \cdot \frac{dx}{d\tau_{np}}. \quad (4)$$

Якщо проінтегрувати рівняння (4) в інтервалі від 0 до x , то можна визначити тривалість прогрівання пакета на глибину x :

$$\tau_{np} = \frac{q_n}{\lambda \cdot (t_{n.ш.} - t_{c.ш.})} \int_0^x x dx = \frac{q_n \cdot x^2}{2 \cdot \lambda \cdot (t_{n.ш.} - t_{c.ш.})}. \quad (5)$$

Для того, щоб визначити тривалість повного прогрівання стружково-полімерного пакета до потрібної температури, у формулу (5) замість x потрібно підставити значення H (див. рис. 1).

Оскільки стружково-полімерний пакет складається зі лушеного шпону, стружки, пінополістиролу, клею, вологи та повітря, то загальний коефіцієнт теплопровідності можна визначати так:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \nu_i, \quad (6)$$

де λ_i – коефіцієнт теплопровідності i -го компонента стружково-полімерного пакета, Вт/(м·°C);

ν_i – об'ємна частка i -го компонента стружково-полімерного пакета.

Виразивши об'ємні частки складників стружково-полімерного пакета через їх відсотковий вміст, формула (6) набуде такого вигляду:

$$\lambda = \frac{\lambda_{\text{д.р.}} \cdot \rho_{\text{пл}}}{\rho_{\text{д.р.}}} \cdot \left(1 - \frac{P_{\text{ППС}}}{100} - \frac{P_{\text{кл}}}{100} - \frac{P_{\text{в}}}{100}\right) + \frac{\lambda_{\text{ПС}} \cdot \rho_{\text{пл}} \cdot P_{\text{ППС}}}{\rho_{\text{ПС}} \cdot 100} + \frac{\lambda_{\text{кл}} \cdot \rho_{\text{пл}} \cdot P_{\text{кл}}}{\rho_{\text{кл}} \cdot 100} + \frac{\lambda_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{пл}} \cdot P_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}} \cdot 100} + \lambda_n \cdot \frac{P_n}{100}, \quad (7)$$

де $\lambda_{\text{д.р.}}$ – коефіцієнт теплопровідності деревної речовини, Вт/(м·°C);

$\lambda_{\text{ПС}}$ – коефіцієнт теплопровідності полістиролу, Вт/(м·°C);

$\lambda_{\text{кл}}$ – коефіцієнт теплопровідності затверділого клею, Вт/(м·°C);

$\lambda_{\text{в}}$ – коефіцієнт теплопровідності води, Вт/(м·°C);

λ_n – коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/(м·°C);

$\rho_{\text{пл}}$ – щільність спресованого стружково-полімерного пакета, кг/м³;

$\rho_{\text{д.р.}}$ – щільність деревної речовини в спресованому стружково-полімерному пакеті, кг/м³;

$\rho_{\text{ПС}}$ – щільність полістиролу в спресованому стружково-полімерному пакеті, кг/м³;

$\rho_{\text{кл}}$ – густина клею (затверділого полімеру) у спресованому стружково-полімерному пакеті, кг/м³;

$\rho_{\text{в}}$ – густина води у спресованому стружково-полімерному пакеті, кг/м³;

$P_{\text{ППС}}$ – відсотковий вміст пінополістиролу в спресованому стружково-полімерному пакеті, %;

$P_{\text{кл}}$ – відсотковий вміст клею в спресованому стружково-полімерному пакеті, %;

$P_{\text{в}}$ – відсотковий вміст вологи в спресованому стружково-полімерному пакеті, %;

P_n – відсотковий вміст порожнин у спресованому стружково-полімерному пакеті, %.

Відсотковий вміст вологи в спресованому стружково-полімерному пакеті, личкованому з двох сторін шпоном, дорівнює (Bekhta, 1994b):

$$P_{\text{в}} = \frac{\left[W_{\text{срп}} \cdot \frac{m_{\text{срп}}}{m_{\text{срп}} + m_{\text{шп}}} + W_{\text{шп}} \cdot \left(1 - \frac{m_{\text{срп}}}{m_{\text{срп}} + m_{\text{шп}}}\right) \right] \cdot K + P_{\text{кл}} \cdot (100 - K)}{K \cdot (100 + P_{\text{кл}})}. \quad (8)$$

Відсотковий вміст порожнин у спресованому стружково-полімерному пакеті розраховують за формулою (Bekhta & Kozak, 1995):

$$P_n = 100 - \rho_{\text{пл}} \cdot \left(\frac{1}{\rho_{\text{д.р.}}} \cdot \left(1 - \frac{P_{\text{ППС}}}{100} - \frac{P_{\text{кл}}}{100} - \frac{P_{\text{в}}}{100}\right) + \frac{P_{\text{ППС}}}{\rho_{\text{ПС}} \cdot 100} + \frac{P_{\text{кл}}}{\rho_{\text{кл}} \cdot 100} + \frac{P_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}} \cdot 100} \right) \cdot 100. \quad (9)$$

Питому витрату теплоти на нагрівання стружкового пакета визначають за таким рівнянням (Ozarkiv et al., 1997, Biley, 2005, Biley et al., 2012):

$$q_n = \frac{m_{\text{пл}}}{V_{\text{пл}}} \cdot C_{\text{пл}} \cdot (t_{\text{нр}} - t_{\text{с.ш.}}) = \rho_{\text{пл}} \cdot C_{\text{пл}} \cdot (t_{\text{нр}} - t_{\text{с.ш.}}) \quad (10)$$

де $m_{\text{пл}}$ – маса стружково-полімерного пакета, кг;

$V_{\text{пл}}$ – об'єм стружково-полімерного пакета; м³;

$C_{\text{пл}}$ – питома теплоємність стружково-полімерного пакета, кДж/(кг·°C);

$t_{\text{нр}}$ – температура, до якої необхідно прогріти стружково-полімерний пакет, °C.

Питому теплоємність стружково-полімерного пакета можна представити через питомі теплоємності його компонентів у вигляді:

$$C_{\text{пл}} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot C_i}{m_{\text{пл}}}, \quad (11)$$

де m_i – маса i -го компонента стружково-полімерного пакета, кг;

C_i – питома теплоємність i -го компонента стружково-полімерного пакета, кДж/(кг·°C).

Виразивши маси складників стружково-полімерного пакета через їх відсотковий вміст у ньому, формула (11) набуде такого вигляду:

$$C_{\text{пл}} = C_{\text{д}} \cdot \left(1 - \frac{P_{\text{ППС}}}{100} - \frac{P_{\text{кл}}}{100} - \frac{P_{\text{в}}}{100}\right) + \frac{C_{\text{ППС}} \cdot P_{\text{ППС}}}{100} + \frac{C_{\text{кл}} \cdot P_{\text{кл}}}{100} + \frac{C_{\text{в}} \cdot P_{\text{в}}}{100}. \quad (12)$$

де $C_{\text{д}}$ – теплоємність абсолютно сухої деревини, кДж/(кг·°C);

$C_{\text{ППС}}$ – теплоємність пінополістиролу, кДж/(кг·°C);

$C_{\text{кл}}$ – теплоємність затверділого клею, кДж/(кг·°C);

$C_{\text{в}}$ – теплоємність води, кДж/(кг·°C).

З урахуванням виразів (7) і (12) формула тривалості прогрівання стружково-полімерного пакета (5) набуде вигляду:

$$\tau_{\text{нр}} = \frac{\rho_{\text{пл}} \cdot \left[C_{\text{д}} \cdot \left(1 - \frac{P_{\text{ППС}}}{100} - \frac{P_{\text{кл}}}{100} - \frac{P_{\text{в}}}{100}\right) + \frac{C_{\text{ППС}} \cdot P_{\text{ППС}}}{100} + \frac{C_{\text{кл}} \cdot P_{\text{кл}}}{100} + \frac{C_{\text{в}} \cdot P_{\text{в}}}{100} \right] \cdot (t_{\text{нр}} - t_{\text{с.ш.}}) \cdot H^2}{2 \cdot \left[\frac{\lambda_{\text{д.р.}} \cdot \rho_{\text{пл}}}{\rho_{\text{д.р.}}} \cdot \left(1 - \frac{P_{\text{ППС}}}{100} - \frac{P_{\text{кл}}}{100} - \frac{P_{\text{в}}}{100}\right) + \frac{\lambda_{\text{ПС}} \cdot \rho_{\text{пл}} \cdot P_{\text{ППС}}}{\rho_{\text{ПС}} \cdot 100} + \frac{\lambda_{\text{кл}} \cdot \rho_{\text{пл}} \cdot P_{\text{кл}}}{\rho_{\text{кл}} \cdot 100} + \frac{\lambda_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{пл}} \cdot P_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}} \cdot 100} + \lambda_n \cdot \frac{P_n}{100} \right] \cdot (t_{\text{нр}} - t_{\text{с.ш.}})}. \quad (13)$$

Формула (13) дає змогу визначити тривалість прогрівання стружково-полімерного пакета у процесі пресування стружково-полімерних плит залежно від застосовуваної сировини і клею, відсоткового вмісту в стружковому пакеті компонентів плити, а також температури пресування.

Результати та обговорення. На основі запропонованої формули тривалості прогрівання стружково-полімерних плит, здійснено розрахунок значень цього параметра для личкованих лушченим шпоном легких плит з пінополістиролом і встановлено залежності від їх щільності, вмісту в них пінополістиролу та температури пресування (таблиця).

Таблиця

**Тривалість прогрівання (в секундах)
середини стружково-полімерного пакета
до температури 100°**

Вміст пінополістиролу (ППС) у плитах, %	Щільність плит, кг/м³					
	350		450		550	
	Температура пресування, °C					
	180	200	180	200	180	200
без ППС	92	82	97	87	101	90
4	95	85	101	90	104	93
7	98	87	103	92	107	95
10	100	89	106	94	110	98

Зі збільшенням щільності плит від 350 кг/м³ до 550 кг/м³ тривалість прогрівання середини стружково-полімерного пакета до 100°C збільшується на 10 % за однакових значень вмісту пінополістиролу в плиті та температур пресування. Таке зростання тривалості прогрівання до 100°C середини стружково-полімерного пакета відбувається через збільшення маси його компонентів за сталого теплового потоку, що передається від плит преса.

Наявність пінополістиролу в стружково-полімерному пакеті спричиняє збільшення тривалості прогрівання його середини до 100°C. Це зростання становить 3, 7 і 9% за вмісту пінополістиролу в плиті відповідно 4, 7 і 10 %, порівняно із плитами без вмісту пінополістиролу. Спричинено це меншою теплопровідністю пінополістиролу порівняно зі стружкою.

Збільшення температури пресування від 180 до 200°C зменшує тривалість прогрівання середини стружково-полімерного пакета до температури 100°C на 12% за однакових щільностей плити і значень вмісту пінополістиролу в ній. З підвищенням температури пресування зростає градієнт температури, який обернено пропорційний часу прогрівання стружково-полімерного пакета (Ozarkiv et al., 1997, Biley, 2005, Biley et al., 2012).

Розраховані за моделлю значення тривалості прогрівання середини пакета без пінополістиролу до температури 100°C збігаються з рекомендованими у літературі (Bekhta, 1994b) значеннями тривалості прогрівання стружкових плит.

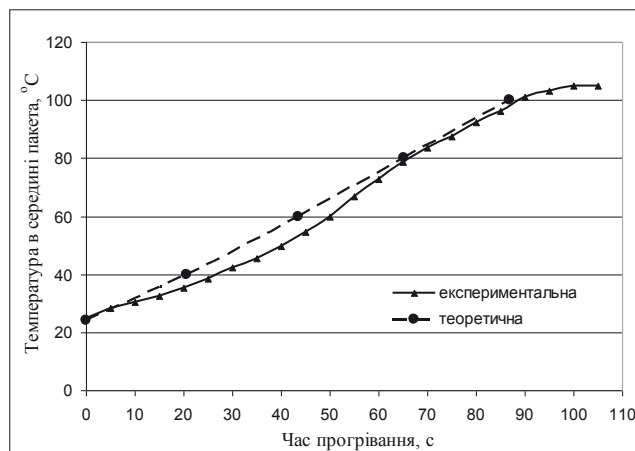


Рис. 2. Залежності температури в середині стружково-полімерного пакета від тривалості його прогрівання (розрахункова щільність плити 350 кг/м³; товщина плити 18 мм; вміст пінополістиролу в плиті 7%; температура плит преса 200 °C)

Для стружково-полімерного пакета з пінополістиролом отриману модель апробовано експериментально. Теоретичну та експериментальну залежності наведено на рис. 2. Значення температури, розраховані за вказаними залежностями, є близькими, що підтверджує адекватність розробленої моделі. Незначні розбіжності в експериментальних і теоретичних значеннях температур у середині пакета зумовлені втратами теплоти в навколишнє середовище, які не враховуються в розробленій моделі.

Висновки. Розроблена математична модель дала змогу зрозуміти взаємодію параметрів компонентів плити, операційних параметрів і готової плити та їх вплив на тривалість прогрівання стружково-полімерного пакета під час пресування легких стружкових плит із вмістом пінополістиролу. Зі збільшенням щільності плит тривалість прогрівання середини стружково-полімерного пакета до 100°C збільшується за однакових значень вмісту пінополістиролу в плиті та температур пресування. Наявність у стружково-полімерному пакеті пінополістиролу з меншою теплопровідністю порівняно з деревинною стружкою спричиняє збільшення тривалості його прогрівання. Це зростання становить 3, 7 і 9% за вмісту пінополістиролу в плиті відповідно 4, 7 і 10%, порівняно із плитами без вмісту пінополістиролу. Підвищення температури пресування від 180 до 200°C зменшує тривалість прогрівання середини стружково-полімерного пакета до температури 100°C на 12% за однакових щільностей плити і значень вмісту пінополістиролу в ній.

Математично змодельована, визначена і проаналізована тривалість прогрівання середини

стружково-полімерного пакета до температури 100°C личкованих лушеним шпоном легких стружкових плит із вмістом пінополістиролу дасть змогу підвищити ефективність технології їх виготовлення.

Бібліографічні посилання

- Bekhta, P. A. (1994a). *Technology and machinery of the particleboard production*. Kyiv: Institute for System Studies of Education (in Ukrainian).
- Bekhta, P. A. (1994b). *Technological calculation in particleboard production*. Kyiv: Institute for System Studies of Education (in Ukrainian).
- Bekhta, P. A. (2004). *Technology of wood-based panels and laminates*. Kyiv: Osnova (in Ukrainian).
- Bekhta, P. A., & Kozak, R. O. (1995). Porosity of particleboards. *Proc. of the XII Symposium of the Adhesives in Woodworking Industry*. Zvolen, Slovakia, 77-80.
- Biley, P. V. (2005). *Theoretical basis of heat treatment and drying of wood*. Kolomyia: Vik (in Ukrainian).
- Biley, P. V., Kunynets, E. P., Sokolovskyy, I. A., Soroka L. Ya., & Synitovych Ya. D. (2012). *Theory of heat treatment of wood*. Lviv: Western Ukrainian Consulting Center (in Ukrainian).
- Carvalho, L. H., Costa, M. R. N., & Costa, C. A. V. (2001). Modeling theology in the hot-pressing of MDF: comparison of mechanical models. *Wood Fiber Sci*, 33, 395-411.
- Carvalho, L. H., Costa, M. R. N., & Costa, C. A. V. (2003). A global model for the hot-pressing of MDF. *Wood Sci Technol*, 37, 241-258.
- Carvalho, L. M., & Costa, C. A. V. (1998). Modeling and simulation of the hot-pressing process in the production of medium density fiberboard (MDF) *Chem Eng Comm*, 170, 1-21.
- Dai, C., Yu, C., & Hubert, P. (2000). Modeling vertical density in wood composites during hot pressing. *Proceedings of the 5th Pacific Rim Bio-based Composites Symposium*, Canberra, Australia.
- Gupta, A., Jordan, P.J., & Pang, S. (2006a). Modelling of vertical density profile of MDF in hot pressing. *Proceedings of CHEMECA 2006 Symposium*. Auckland, N.Z.
- Gupta, A., Jordan, P.J., & Pang, S. (2006c). Development of an Empirical Model for MDF Hot press and Comparison with a Fundamental Model. *Proceedings of the 8th Pacific Rim Bio-based Composites Symp*. KL, Malaysia, 379-389.
- Gupta, A., Jordan, P.J., Pang, S., & Chapman, K.M. (2006b). Modelling of hot pressing of MDF. *Proc. of 10th European Panel Product Symp.*, Llandudno, U.K.
- Gupta, A., Jordan, P. J., Pang, S., & Chapman, K. M. (2005). Dependence of mechanical properties of MDF panels on the panel density. *Proc. of the 2005 joint conference of SCENZ / FEANZ. Symp.* Christchurch, N.Z., 6-13.
- Harless, T. E. G., Wagner, F. G., Short, P. H., Dan Seale, R., Mitchell, P. H. & Ladd, D. S. (1987). A model to predict the density profile of particleboard. *Wood Fiber Sci* 19 (1), 81-92.
- Haselein, C. R. (1998). Numerical simulation of pressing wood-fiber composites. *Ph.D. Thesis, Oregon State University*, Corvallis, OR.
- Hata, T., Kawai, S., & Sasaki, H. (1990). Computer simulation of temperature behavior in particle mat during hot pressing and steam injection pressing. *Wood Sci Technol* 24, 65-78.
- Hubert, P., & Dai, C. (1998). An object-oriented finite element processing model for oriented strand board wood composites. *Proceedings of the 13th Int. Conf. on Composite Materials*. Paris, France, 28-33.
- Humphrey, P., & Bolton, A. J. (1989). The hot pressing of dry formed wood-based composites. Part II: Simulation model for heat and moisture transfer, and typical results. *Holzforschung*, 43 (3), 199-206.
- Kamke, F. A., & Wolcott, M. P. (1991). Fundamentals of flakeboard manufacture: wood-moisture relationships. *Wood Sci Technol*, 25, 57-71.
- Ozarkiv, I.M., Soroka, L.Ya., & Hrytsyuk, Yu.I. (1997). *Fundamentals of aerodynamics and heat-mass transfer*. Kyiv: Institute of tools and teaching methods (in Ukrainian).
- Pereira, C., Carvalho, L. M. H., & Costa C. A. V. (2006). Modeling the continuous hot-pressing of MDF. *Wood Sci Technol*, 40, 308-326.
- Suo, S., & Bowyer, J. L. (1994). Simulation modeling of particleboard density profile. *Wood Fiber Sci* 26, 397-411.
- Thoemen H., & Humphrey P.E. (2001) Hot-pressing of wood-based composites: selected aspects of physics investigated by means of simulation. *Proceedings of 5th European Panel Products Symposium*. Llandudno, North Wales, UK, 38-49.
- Thoemen, H., & Humphrey, P. E. (1999). The continuous pressing process for wood-based panels: an analytical model. *Proceedings of the third European Panel Products Symposium*. Llandudno, Wales, UK, 18-30.
- Thoemen, H., & Humphrey, P. E. (2003). Modeling the continuous pressing process for wood-based composites. *Wood Fiber Sci*, 35, 456-468.
- Thoemen, H. (2000). Modeling the physical processes in natural fiber composites during batch and continuous pressing. *Ph.D. Thesis, Oregon State University*, Corvallis, OR.
- Zombori, B. (2001). Modeling the transient effects during the hot-pressing of wood-based composites. *PhD thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University*, Blacksburg, Virginia, USA.
- Zombori, G. B., Kamke, F. A., & Watson, L. T. (2003). Simulation of the internal conditions during the hot pressing process. *Wood Fiber Sci*, 35 (1), 2-23.

Математическая модель процесса прессования легких стружечных плит с содержанием пенополистирола

П. А. Бэхта¹, Л. Р. Байзова²

Предположив, что стружечно-полимерный пакет, облицованный лущеным шпоном, имеет вид пластины, расположенной между нагретыми до определенной температуры плитами пресса, применив известные законы теплопроводности Фурье и уравнение количества теплоты, которое используется на прогрев материала на соответствующую глубину, предложена математическая модель процесса прессования легких стружечных плит с различным содержанием пенополистирола, которая сочетает физические свойства составляющих компонентов стружечно-полимерного пакета, готовой облицованной лущеным шпоном легкой стружечной плиты с содержанием пенополистирола и параметры режима прессования. На основе математической модели рассчитана продолжительность прогрева стружечно-полимерного пакета до 100 °С в зависимости от температуры плит пресса, плотности готовых плит и содержания в них пенополистирола. Установлено, что с увеличением плотности плит с 350 кг/м³ до 550 кг/м³ продолжительность прогрева середины стружечно-полимерного пакета до 100 °С увеличивается на 10% при одинаковых значениях содержания пенополистирола в плите и температур прессования. Такой рост продолжительности прогрева до 100 °С середины стружечно-полимерного пакета происходит из-за увеличения массы его компонентов при постоянном тепловом потоке, передаваемом от плит пресса. Наличие пенополистирола в стружечно-полимерном пакете приводит к увеличению продолжительности прогрева его середины до 100 °С. Этот рост составляет 3, 7 и 9% при содержании пенополистирола в плите соответственно 4, 7 и 10% по сравнению с плитами без содержания пенополистирола. Причиной этого есть меньшая теплопроводность пенополистирола по сравнению с древесной стружкой. Увеличение температуры прессования с 180 до 200 °С уменьшает продолжительность прогрева середины стружечно-полимерного пакета до температуры 100 °С на 12% при одинаковых плотностях готовой плиты и значениях содержания пенополистирола в ней. С увеличением температуры прессования

возрастает градиент температуры, который обратно пропорционален времени прогрева стружечно-полимерного пакета. Рассчитанные по модели значения продолжительности прогрева середины пакета без пенополистирола до температуры 100 °С совпадают с рекомендованными в литературе значениями продолжительности прогрева стружечных плит. Для стружечно-полимерного пакета с пенополистиролом полученная модель апробирована экспериментально. Значение теоретической и экспериментальной зависимостей близки, что подтверждает адекватность разработанной модели. Незначительные расхождения в экспериментальных и теоретических значениях температур в середине пакета обусловлены потерями теплоты в окружающую среду, которые не учитываются в разработанной модели.

Ключевые слова: легкие стружечные плиты; пенополистирол; лущеный шпон; древесная стружка; карбамидоформальдегидный клей; теплопроводность; градиент температуры; удельный расход теплоты; удельная теплоемкость; температурный интервал прогрева; математическая модель.

Mathematical model of the pressing process of lightweight particleboards with the expanded polystyrene in content

P. Bekhta¹, L. Bajzova²

Assuming that the chip-polymer package overlaid by rotary-cut veneer has the form of a plate located between the press plates heated to a certain temperature, and applying the known laws of Fourier thermal conductivity and the equation of heat quantity which is used to heat the material to the appropriate depth, a mathematical model of the pressing process of lightweight particleboards with different contents of expanded polystyrene was proposed. The model combines the physical properties of the constituent components of the chip-polymer package of the overlaid by rotary-cut veneer lightweight particleboard containing expanded polystyrene and the parameters of the pressing regime. Duration of heating of chip-polymer package up to 100 °C depending on the pressing temperature, the density of the boards and the content of expanded polystyrene based on the mathematical model was

¹ Бэхта Павло Антонович – академик Лесной академии наук Украины, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологий древесных композиционных материалов, целлюлозы и бумаги. Национальный лесотехнический университет Украины, ул. генерала Чупрынки, 103, г. Львов, 79057, Украина. Тел.: 032-238-44-99, E-mail: bekhta@ukr.net

² Байзова Любов Руслановна – аспирант кафедры технологий древесных композиционных материалов, целлюлозы и бумаги. Национальный лесотехнический университет Украины, ул. генерала Чупрынки, 103, г. Львов, 79057, Украина. Тел.: 032-238-44-99, + 38-093-622-18-08. E-mail: kozak_l@nltu.edu.ua

¹ Pavlo Bekhta – full Member of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Wood-Based Composites, Cellulose and Paper. Ukrainian National Forestry University, Generala Chuprynky st., 103, Lviv, 79057, Ukraine. Tel.: 032-238-44-99, E-mail: bekhta@ukr.net

² Liubov Bajzova – post-graduate student in the Department of Wood-Based Composites, Cellulose and Paper. Ukrainian National Forestry University, Generala Chuprynky st., 103, Lviv, 79057, Ukraine. Tel.: 032-238-44-99, + 38-093-622-18-08. E-mail: kozak_l@nltu.edu.ua

calculated. It was found that the duration of heating of the chip-polymer package up to 100°C increases by 10% with an increase in the density of the boards from 350 kg/m³ to 550 kg/m³ for the same values of the contents of the expanded polystyrene and the pressing temperatures. This increase in the duration of heating the middle of the chip-polymer package up to 100°C is due to the increase in the mass of its components at a constant heat flux transmitted from the press plates. The presence of expanded polystyrene leads to an increase in the duration of heating of the chip-polymer package up to 100°C. This growth was 3, 7 and 9% with the content of expanded polystyrene in the boards 4, 7 and 10%, respectively, compared to the boards without the expanded polystyrene. The reason for this is the lower thermal conductivity of polystyrene foam compared to wood particles. An increase in the pressing temperature from 180°C to 200°C reduces by 12% the heating time of the chip-polymer package to 100°C at the same densities of the boards and the values of the expanded polystyrene content. As the pressing temperature increases, the temperature

gradient increases, which is inversely proportional to the heating time of the chip-polymer package. Calculated by the model, the value of the duration of heating the middle of the package without expanded polystyrene to a temperature of 100°C coincides with the values of the duration of heating of the particleboards recommended in the literature. For the chip-polymer package with expanded polystyrene, the resulting model was tested experimentally. The values of theoretical and experimental dependencies are close, which confirms the adequacy of the developed model. Minor discrepancies in the experimental and theoretical values of the temperatures in the middle of the package are due to the heat losses into the environment, which are not taken into account in the developed model.

Key words: lightweight particleboard; expanded polystyrene; rotary-cut veneer; wood particles; urea formaldehyde glue; thermal conductivity; temperature gradient; specific heat consumption; specific heat; temperature interval of heating; mathematical model.