



**П. А. Бехта, Р. О. Козак, І. І. Кусняк**

*Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна*

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРОГРІВАННЯ ПАКЕТА ШПОНУ, СКЛЕЄНОГО ТЕРМОПЛАСТИЧНОЮ ПЛІВКОЮ

Запропоновано математичну модель процесу прогрівання пакета шпону, склеєного термопластичною плівкою поліетилену низької густини (ПЕНГ). Розроблена математична модель дає змогу визначити як температуру в заданій точці пакета шпону, так і тривалість, потрібну для нагрівання пакета шпону до заданої температури, залежно від застосовуваної сировини й режимних параметрів пресування. На підставі запропонованої математичної моделі розраховано зміну температурного поля по товщині пакета під час склеювання фанери поліетиленовою плівкою, виконано розрахунок значень тривалості прогрівання пакета шпону і встановлено залежності цього показника від витрати термопластичної плівки та температури пресування. Тривалість прогрівання пакета шпону, склеєного термопластичною плівкою, залежить від температури, за якої термопластичний полімер перейде із високоеластичного у в'язкотекучий стан. Перехід термопластичної плівки ПЕНГ у в'язкотекучий стан розпочинається за температури 125 °С і триває до 240 °С. Встановлено, що зі зростанням температури плит преса від 140 до 180 °С тривалість прогрівання середини пакета до 125 °С зменшується на 89 % за всіх досліджуваних витрат полімеру. Зміна вмісту полімеру в пакеті не чинить істотного впливу на тривалість його прогрівання. Зі збільшенням витрати термопластичної плівки від 130 до 190 г/м<sup>2</sup> тривалість прогрівання середини пакета шпону до 125 °С збільшується неістотно, від 3,8 до 4,2 %, залежно від температури пресування. Для перевірки достовірності моделі було проведено експерименти щодо замірів температури всередині пакета шпону в процесі його пресування. Збіжність значень, отриманих експериментальним шляхом та розрахункових даних, в інтервалі до досягнення температури в центрі пакета 100 °С знаходиться в межах 88<sup>±7</sup> %, тоді як в інтервалі від 100 до 125 °С – 78<sup>±8</sup> %. Значення теоретичної та експериментальної залежностей є близькими, що підтверджує адекватність розробленої моделі. Математично змодельована, розрахована і проаналізована тривалість прогрівання середини пакета шпону, склеєного термопластичною плівкою, дасть змогу підвищити ефективність технології виготовлення фанери.

**Ключові слова:** лущений шпон; поліетилен низької густини; теплопровідність; питома теплоємність; щільність пакета; температура текучості.

### Вступ

Ринок продукції деревинних композиційних матеріалів сьогодні досить динамічно розвивається, а саме їх виробництво є перспективним [22]. Деревинні композиції мають великий потенціал у виробництві енергозберігаючої продукції, попит на яку характеризується стійкою тенденцією до зростання. Перспективним різновидом деревинних композиційних матеріалів є шаруваті композити, до яких відносять і фанеру, склеєну термопластичними полімерами. Однак виготовлення такої фанери потребує коректування режимів пресування, адже гарячий спосіб пресування пакетів шпону, склеєних термопластичними плівками, дещо відрізняється від способу пресування пакетів шпону, склеєних термореактивними клеями [3]. Для склеювання шпону термопластичними полімерами, а саме плівками, у виробництві фанери, необхідно прогріти пакет з листів шпону й полімерної плівки по всій його товщині до температури, за якої б плівка, як клеїльний матеріал, перейшла у в'язкотекучий стан. Перебуваючи у в'язкотекучому стані, полімер механічно проникає в пори, порожнини клітин, тріщини двох склеюваних поверхонь, затвердіває там і заклинюється [11, 12, 13, 20].

Процеси, що відбуваються під час склеювання пакетів шпону у пресі, характеризуються складністю взаємопов'язаних різних за характером хімічних і фізико-механічних величин і фазових перетворень, які за-

няється від способу пресування пакетів шпону, склеєних термореактивними клеями [3]. Для склеювання шпону термопластичними полімерами, а саме плівками, у виробництві фанери, необхідно прогріти пакет з листів шпону й полімерної плівки по всій його товщині до температури, за якої б плівка, як клеїльний матеріал, перейшла у в'язкотекучий стан. Перебуваючи у в'язкотекучому стані, полімер механічно проникає в пори, порожнини клітин, тріщини двох склеюваних поверхонь, затвердіває там і заклинюється [11, 12, 13, 20].

Процеси, що відбуваються під час склеювання пакетів шпону у пресі, характеризуються складністю взаємопов'язаних різних за характером хімічних і фізико-механічних величин і фазових перетворень, які за-

### Інформація про авторів:

**Бехта Павло Антонович**, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу. Email: bekhta@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-4320-5247>

**Козак Руслан Олегович**, д-р техн. наук, доцент, кафедра технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу. Email: kozak\_r@nltu.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0003-1297-9810>

**Кусняк Ірина Іванівна**, асистент, кафедра технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу. Email: iryna.rondyak@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-3980-3110>

**Цитування за ДСТУ:** Бехта П. А., Козак Р. О., Кусняк І. І. Математичне моделювання процесу прогрівання пакета шпону, склеєного термопластичною плівкою. Науковий вісник НЛТУ України. 2020, т. 30, № 3. С. 93–98.

**Citation APA:** Bekhta, P. A., Kozak, R. O., & Kusniak, I. I. (2020). Mathematical modeling of the process of warming of veneer package glued with thermoplastic film. *Scientific Bulletin of UNFU*, 30(3), 93–98. <https://doi.org/10.36930/40300317>

лежать від вмісту вологи, температури, породи деревини та виду клею [18]. Серед основних процесів, які відбуваються у процесі склеювання фанери, є тепломасообмінні. Наявність термопластичної плівки між листами шпону змінюватиме теплопровідність пакета, а отже, впливатиме на тривалість процесу пресування. Тому знання про тривалість прогрівання пакета шпону, що склеюється термопластичною плівкою, є дуже важливими для виготовлення фанери задовільної якості та раціонального використання енергетичних ресурсів.

Існує низка досліджень щодо особливостей пресування шаруватих матеріалів та математичного моделювання тривалості прогрівання конкретного композиційного матеріалу [4, 7, 14, 16, 17, 19]. Автори робіт намагалися описати явища під час пресування деревинно-полімерних композитів та вирішити задачу визначення температурного поля під час склеювання в гарячому плоскому пресі. Аналітичне розв'язання задачі зводиться до розв'язання диференціальних рівнянь теплопровідності або застосування значення температуропровідності.

Проте знання про процес прогрівання пакетів з листів шпону і термопластичної плівки поліетилену низької густини (ПЕНГ) є обмеженими. Отже, невирішеною частиною проблеми є визначення зміни температурного поля пакета зі шпону та термопластичної плівки у часі у виробництві фанери, склеєної термопластичною плівкою.

Детальне дослідження та моделювання процесів тепломасоперенесення під час пресування листів шпону, що склеюються поліетиленовою плівкою, дасть змогу виявити шляхи подальшої інтенсифікації та вдосконалення процесу виготовлення фанери.

*Об'єкт дослідження* – процес склеювання пакетів шпону у виробництві фанери.

*Предмет дослідження* – методи і засоби розроблення математичної моделі процесу прогрівання пакета шпону, склеєного термопластичною плівкою, що дає змогу визначити температуру в заданій точці пакета шпону і тривалість процесу залежно від застосовуваної сировини й режимних параметрів пресування.

*Мета дослідження* – математично змоделювати процес прогрівання пакета шпону, склеєного термопластичною плівкою, що дає змогу визначити як температуру в заданій точці пакета шпону, так і тривалість, потрібну для нагрівання пакета шпону до заданої температури, залежно від застосовуваної сировини й режимних параметрів пресування.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі *основні завдання дослідження*:

- розробити математичну модель процесу прогрівання пакета шпону;
- розрахувати тривалість прогрівання пакета шпону до заданої температури під час пресування фанери;
- розраховані за моделлю значення тривалості прогрівання середини пакета шпону порівняти з експериментальними даними.

*Наукова новизна* дослідження полягає в тому, що вперше розроблено математична модель процесу прогрівання пакета шпону, склеєного термопластичною плівкою, яка дає змогу визначити як температуру в заданій точці пакета шпону, так і тривалість, потрібну для нагрівання пакета шпону до заданої температури, залежно від застосовуваної сировини й режимних параметрів пресування.

*Практична значущість* отриманих результатів дослідження полягає в тому, що на підставі запропонованої

математичної моделі розраховано зміну температурного поля по товщині пакета під час склеювання фанери поліетиленовою плівкою, виконано розрахунок значень тривалості прогрівання пакета шпону і встановлено залежності цього показника від витрати термопластичної плівки та температури пресування.

*Матеріали і методи дослідження.* В основу розроблення математичної моделі процесу прогрівання пакета шпону, склеєного термопластичною плівкою, закладено метод моделювання. Результати моделі отримано з використанням методів нелінійного програмування, рівномірного пошуку та зведеного градієнта. Адекватність розробленої моделі визначено методом порівняння результатів теоретичних і експериментальних досліджень.

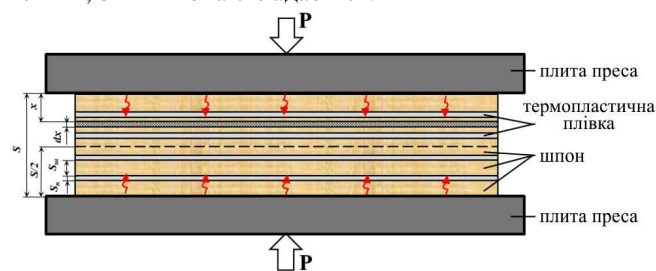
## Результати дослідження

Згідно з фізико-хімічними процесами, які відбуваються всередині пакета шпону під час пресування фанери, тривалість її пресування залежатиме від тривалості прогрівання середнього шару до температури поліконденсації клею, тривалості затвердіння клею і тривалості випаровування надлишкової вологи з пакета [8]. Оскільки для виготовлення фанери замість традиційних термореактивних клеїв використовують термопластичну плівку, то в пакеті шпону немає надлишкової вологи, а затвердіння плівки відбуватиметься після пресування. Тому тривалість процесу пресування фанери з використанням термопластичних плівок зводиться тільки до тривалості прогрівання пакета до температури, за якої термопластичний полімер перейде у в'язкотекучий стан і може бути записана у такому вигляді:

$$\tau_{\text{внт}} = \tau_{\text{пр}}, \quad (1)$$

де:  $\tau_{\text{внт}}$  – тривалість процесу пресування фанери у пресі, хв;  $\tau_{\text{пр}}$  – тривалість прогрівання середнього шару фанери до температури переходу клейової плівки у в'язкотекучий стан, хв.

Тривалість прогрівання середнього шару фанери до температури в'язкотекучого стану термопластичної плівки залежить від теплопровідності шпону і клейової плівки, з яких вона складається.



**Рис. 1.** Схематичне зображення пресування пакета шпону між плитами преса

Якщо припустити, що пакет має вигляд пластини (рис. 1), яка розташована між нагрітими до певної температури плитами преса ( $t_{\text{пл}}$ ), то, згідно з відомим законом теплопровідності Фур'є, величина теплового потоку ( $dQ$ ) прямо пропорційна коефіцієнту теплопровідності ( $\lambda$ ), градієнту температури ( $dt/dx$ ) та площі поверхні матеріалу ( $F$ ). Математично це можна записати так [5, 6, 15]:

$$\frac{dQ}{d\tau_{\text{пр}}} = -\lambda \cdot F \cdot \frac{dt}{dx}. \quad (2)$$

Враховуючи, що товщина пакета в багато разів менша від його довжини і ширини, то теплопередачею від

бокових крайок можна знехтувати. Вважатимемо, що тепловий потік в ньому рухається тільки за товщиною, від поверхні до середини. Тому існує одномірний тепловий потік, для якого справедливе диференціальне рівняння теплопровідності Фур'є-Кірхгофа [8]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau_{np}} = a \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (3)$$

де  $a$  – коефіцієнт температуропровідності пакета,  $\text{м}^2/\text{год}$ .

За умов [18]:

$$\tau_{np} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } t = t_{nc}; \\ \infty, & \text{якщо } t = t_{nl}; \end{cases} \quad x = \begin{cases} 0, & \text{якщо } t = t_{nc}; \\ S, & \text{якщо } t = t_{nl}. \end{cases} \quad (4)$$

де:  $t_{nc}$  – температура навколишнього середовища,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{nl}$  – температура плит преса,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t$  – температура в заданій точці пакета,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $S$  – товщина фанери,  $\text{мм}$ ;  $x$  – відстань від поверхні пакету до визначеної глибини прогрівання,  $\text{мм}$ .

Згідно з літературними джерелами [1, 8, 18], рівняння (3) має такий розв'язок:

$$t = t_{nl} - \frac{4 \cdot (t_{nl} - t_{nc}) \cdot x}{S} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin(2 \cdot n + 1)}{2 \cdot n + 1} \cdot f(n), \quad (5)$$

де:  $f(n) = \text{Exp}\left(-\frac{(2 \cdot n + 1)^2 \cdot \pi^2}{4} \cdot F_o\right)$ ;  $F_o$  – критерій Фур'є [8, 18], значення якого можна визначити за такою формулою

$$F_o = \frac{4 \cdot a \cdot \tau_{np}}{S^2}. \quad (6)$$

На підставі рівнянь (5) і (6) може бути встановлена тривалість прогрівання пакета під час пресування фанери за виразом:

$$\tau_{np} = \frac{F_o \cdot S^2}{4 \cdot a} = f(\Theta, x, S, a), \quad (7)$$

де  $\Theta$  – температурний критерій, який визначається з виразу:

$$\Theta = \frac{t_{nl} - t}{t_{nl} - t_{nc}}. \quad (8)$$

Коефіцієнт температуропровідності пакета визначають за формулою [8, 18]:

$$a = \frac{\lambda}{C \cdot \rho}, \quad (9)$$

де:  $C$  – питома теплоємність пакета,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $\rho$  – щільність пакета,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Оскільки пакет складається зі шпону та полімерної плівки, то загальні щільність, коефіцієнти теплопровідності та теплоємності пакета відповідно можна визначити так:

$$\rho = k \cdot \rho_n + (1 - k) \cdot \rho_{ul}; \quad (10)$$

$$\lambda = \frac{1}{\frac{k}{\lambda_n} + \frac{1-k}{\lambda_{ul}}} = \frac{\lambda_n \cdot \lambda_{ul}}{\lambda_{ul}k + (1-k)\lambda_n}; \quad (11)$$

$$C = \frac{C_n \cdot k \cdot \rho_n + C_{ul} \cdot (1-k) \cdot \rho_{ul}}{\rho}, \quad (12)$$

де:  $k$  – об'ємна частка полімеру на ділянці прогрівання  $x$ ;  $\rho_n$  і  $\rho_{ul}$  – відповідно, густина полімерної плівки і щільність шпону в пакеті,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\lambda_n$  і  $\lambda_{ul}$  – відповідно, коефіцієнт теплопровідності полімерної плівки і шпону в пакеті,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $C_n$  і  $C_{ul}$  – відповідно, питома теплоємність полімерної плівки і шпону в пакеті,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$ .

Фанера належить до неоднорідних матеріалів, у якій шпон і термопластична плівка чергуються. Тому вираз об'ємної частки полімеру на ділянці прогрівання  $x$  буде залежати від матеріалу, в якому знаходиться гранична площа відрізка  $x$  і порядкового номера шпону чи полімерної плівки на ділянці від поверхні пакета до його середини. Вирази об'ємної частки полімеру на ділянці прогрівання  $x$ , якщо гранична площа відрізка  $x$  знаходиться в шпоні та у полімерній плівці визначаються так:

- у шпоні

$$k = \frac{(m-1) \cdot S_n}{x}; \quad (13)$$

- у термопластичній плівці

$$k = \frac{x - m \cdot S_{ul}}{x}, \quad (14)$$

де:  $m$  – кількість шарів шпону чи шарів термопластичної плівки на відрізку  $x$ ;  $S_n$  – товщина полімерної плівки у спресованому пакеті,  $\text{мм}$ ;  $S_{ul}$  – товщина шпону у спресованому пакеті,  $\text{мм}$ .

Деякі фізичні параметри компонентів пакета шпону залежать від температури на відрізку  $x$  пакета, тому їх значення встановлюють за розрахункової температури пакета на відрізку  $x$  [8]:

$$t_p = \frac{t_{nc} + t_i}{2}, \quad (15)$$

де  $t_i$  – інтегральна температура пакета шпону,  $^{\circ}\text{C}$ .

Інтегральну температуру пакета шпону визначають за допомогою такого рівняння [8]:

$$t_i = t_{nl} - 2 \cdot (t_{nl} - t_{nc}) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-(n-1/2)^2 \cdot \pi^2 \cdot F_o}}{(n-1/2)^2 \cdot \pi^2}. \quad (16)$$

З урахуванням виразів (9)–(12) формула температури в заданій точці пакета шпону (5) набуде вигляду:

$$t = t_{nl} - \frac{4 \cdot (t_{nl} - t_{nc}) \cdot x}{S} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin(2 \cdot n + 1)}{2 \cdot n + 1} \cdot F(n), \quad (17)$$

де  $F(n) = \text{Exp}\left(\frac{-(2 \cdot n + 1)^2 \cdot \pi^2 \cdot \tau_{np}}{S^2 \cdot \lambda_n \cdot \lambda_{ul} \cdot (\lambda_{ul}k + (1-k)\lambda_n) \cdot (C_nk\rho_n + C_{ul}(1-k)\rho_{ul})}\right)$ .

Формула (17) дає змогу визначити як температуру в заданій точці пакета шпону, так і тривалість, потрібну для нагрівання пакета до заданої температури, під час пресування фанери залежно від застосовуваної сировини й режимних параметрів пресування.

Як було зазначено у роботі [10], склеювання багатошарової фанери можливе тільки за значного збільшення часу, який зростає пропорційно квадрату товщини фанери. Тобто виробництво товстої багатошарової фанери значно знижує продуктивність. До методів, які на практиці довели більшу ефективність прогрівання незалежно від товщини пакета шпону, можна віднести застосування струмів високих частот (СВЧ). Адже внаслідок швидкого прогрівання склеюваного пакета за всією товщиною тривалість витримки в запресованому стані може бути доведена до 2-5 хв незалежно від товщини пакета, оскільки нагрівання кожної її точки відбувається одночасно зі швидкістю, яка залежить від питомої потужності, що поглинається деревиною. Найвні дослідження у напрямку використання СВЧ у виробництві композитних матеріалів, фанери показують ефективність прогрівання саме товстих пакетів.

До альтернативних способів підведення тепла та джерел теплової енергії можна також віднести інфра-



червоне випромінювання (ІЧ), яке широко використовують для сушіння та нагрівання різного роду матеріалів, зокрема і деревини [9]. Дослідження впливу інфрачервоного випромінювання на деревину показали, що деревина є проникним матеріалом для цього виду випромінювання й сприяє виведенню з неї вологи. Інфрачервоні промені здатні проникати в деревину на певну глибину, залежно від породи, вологості матеріалу та довжини хвилі променя. Цей метод дає змогу пришвидшити підведення тепла до листів шпону та клейово-

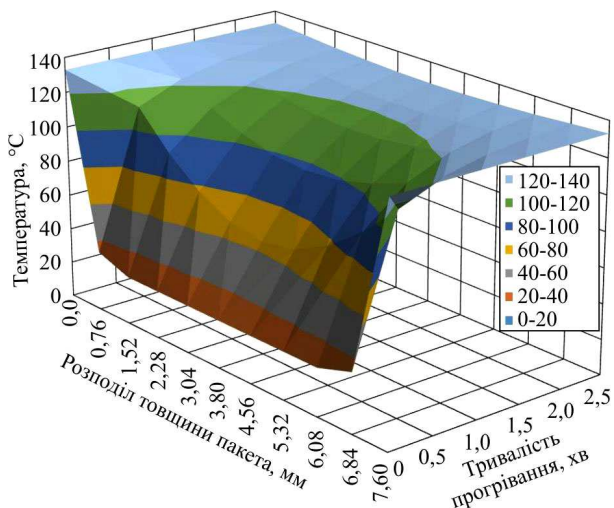
го шва безпосередньо, через радіаційний розподіл температури по товщині пакета шпону.

**Обговорення результатів дослідження.** На підставі запропонованої формули (17) визначено зміну температурного поля по товщині пакета шпону під час склеювання фанери поліетиленовою плівкою. Здійснено розрахунок значень тривалості прогрівання пакета шпону і встановлено залежності від витрати термопластичної плівки та температури пресування (таблиця).

**Таблиця. Тривалість прогрівання (в секундах) всередині пакета шпону відповідно до температури в заданій точці пакета**

Температура всередині пакета шпону, °C	Витрата термопластичної плівки, г/м <sup>2</sup>											
	130			150			170			190		
	Температура пресування, °C											
	140	160	180	140	160	180	140	160	180	140	160	180
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	15,1	14,1	13,3	15,3	14,3	13,5	15,4	14,4	13,7	15,6	14,6	13,8
60	26	23,3	21,4	26,3	23,6	21,7	26,6	23,9	22	26,9	24,2	22,2
80	39,2	33,8	30,1	39,7	34,2	30,5	40,2	34,6	30,9	40,7	35	31,3
100	57,9	47,2	40,7	58,7	47,8	41,2	59,4	48,4	41,7	60,1	49	42,3
120	90,1	66,2	54,4	91,3	67,1	55,2	92,4	68	55,9	93,6	68,9	56,6
140	320,5	99,3	74,3	325	100,7	75,4	329,4	102,2	76,5	333,7	103,6	77,6
160		337,2	109		342,6	111		347,9	112,8		353,1	114,6
180			370,9			380,5			389,9			399,1

Графічну залежність тривалості прогрівання від зміни температурного поля по товщині пакета наведено на рис. 2.

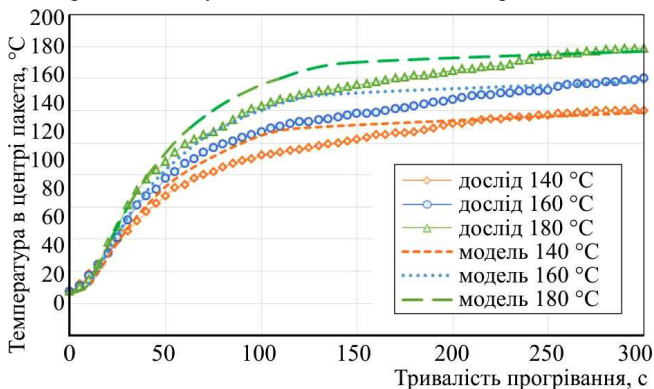


**Рис. 2.** Зміна температурного поля по товщині пакета під час склеювання п'ятишарової фанери поліетиленовою плівкою за температури пресування – 140 °C; початкової температури пакета – 26 °C; витрати плівки – 130 г/м<sup>2</sup>; товщини березового шпону – 1,6 мм

Для склеювання шпону термопластичними плівками ПЕНГ у виробництві фанери важливим фактором є температура прогрівання. Річ у тім, що термопластична плівка в момент склеювання повинна перейти у в'язкотекучий стан для проникнення у структуру шпону. Перехід термопластичної плівки ПЕНГ у в'язкотекучий стан розпочинається за температури 125 °C і триває до 240 °C [21]. Згідно з даними таблиці, із зростанням температури плит преса від 140 до 180 °C тривалість прогрівання середини пакета шпону до 125 °C зменшується на 89 % за досліджуваної витрати полімеру. Це пов'язано зі зростанням градієнта температури, який обернено пропорційний часу прогрівання пакета шпону [18].

Зі збільшенням витрати термопластичної плівки від 130 до 190 г/м<sup>2</sup> тривалість прогрівання середини пакета шпону збільшується неістотно – від 3,8 до 4,2 % залежно від температури пресування. Це відбувається через збільшення кількості матеріалу по товщині, яку потрібно прогріти до температури текучості полімеру.

Для перевірки достовірності моделі було проведено експерименти [2] щодо замірів температури всередині пакета шпону в процесі його пресування. Теоретичну та експериментальну залежності наведено на рис. 3.



**Рис. 3.** Залежності зміни температури всередині пакета шпону від тривалості його прогрівання (витрата полімеру 130 г/м<sup>2</sup>; температура плит преса від 140 до 180 °C)

Для інших досліджуваних витрат 150, 170 та 190 г/м<sup>2</sup> спостерігається аналогічний характер кривих залежностей зміни температури в середині пакета шпону від тривалості його прогрівання. Аналіз кривих тривалості прогрівання пакета шпону, склеєного ПЕНГ (див. рис. 3) за різної витрати полімеру та температури пресування, показує однакову тенденцію швидкості прогрівання за всіх трьох досліджуваних температур. Процес прогрівання пакета можна розділити на чотири етапи: етап прогрівання, етап випаровування вологи, етап плавлення термопластичного полімеру та етап по-

дальшого прогрівання пакета. З підвищенням температури пакета до 100 °С відбувається прогрівання шпону та термопластичної плівки. Через відсутність вологи у структурі термопластичного полімеру, у момент досягнення температури в пакеті 100 °С відбувається випаровування вологи тільки із поверхні шпону. Для склеювання пакета використовують шпон незначної вологості  $6 \pm 2\%$ . Водночас термопластичний полімер здатний проникати в клітини та судини шпону, утворюючи механічне блокування шляхом формування ґратки в клейових шарах всією діагоналлю, не блокуючи структури деревини. Цей факт говорить про те, що волога легко може виходити із шпону через судини та волокна, розташовані поздовжньо і, цим самим, не впливати на зменшення витрати тепла та підвищення температури матеріалу [11]. У момент досягнення температури в пакеті 115 °С відбувається перехід кристалоаморфної термопластичної плівки ПЕНГ із склоподібного стану у високоеластичний (процес плавлення). З подальшим зростанням температури від 115 до 125 °С відбувається перехід полімеру із високоеластичного стану у в'язкотекучий, що є необхідною умовою для склеювання листів шпону.

Порівнюючи значення, отримані експериментальним шляхом та розрахункових даних (див. рис. 3), встановлено, що величина збігу в інтервалі від початку прогрівання та до досягнення температури в центрі пакета 100 °С знаходиться в межах 88%, тоді як в інтервалі від 100 до 125 °С – 78%. Незначні розбіжності в експериментальних і теоретичних значеннях температур всередині пакета за температур вищих 100 °С зумовлені втратами теплоти у навколишнє середовище, переходом води у пароподібний стан і змінами в анатомічній будові шпону, які не враховувалися під час розрахунків. Значення теоретичної та експериментальної залежностей є близькими, що підтверджує адекватність розробленої моделі та дає змогу застосовувати її для розрахунку процесів прогрівання пакета шпону під час виготовлення фанери, склеєної термопластичною плівкою.

## Висновки

Запропонована математична модель дає змогу встановити вплив параметрів матеріалу та режиму пресування фанери на тривалість прогрівання пакета шпону під час виготовлення фанери, склеєної термопластичною плівкою ПЕНГ. Підвищення температури пресування від 140 до 180 °С зменшує на 89% тривалість прогрівання центру пакета до температури 125 °С за різної витрати полімеру. Витрата термопластичного полімеру від 130 до 190 г/м<sup>2</sup> змінює тривалість прогрівання середини пакета від 3,8 до 4,2% залежно від температури пресування, тому її вплив є неістотним.

Тривалість процесу пресування фанери з використанням термопластичних плівок зводиться тільки до тривалості прогрівання пакету до температури вище 125 °С, за якої термопластичний полімер перейде у в'язкотекучий стан. Відсутнім є час на випаровування надлишкової вологи та поліконденсацію клею, які існують під час виготовлення фанери з використанням терморективних клеїв. Саме тому для виготовлення п'ятишарової фанери, склеєної термопластичною плівкою ПЕНГ, витратою від 130 г/м<sup>2</sup> до 190 г/м<sup>2</sup> за температури пресування від 140 до 180 °С достатнім буде час 1,5–3,0 хв.

Цей факт дає підстави стверджувати про можливість збільшення продуктивності дільниці склеювання фанери завдяки зменшенню циклу пресування.

## References

1. Bekhta, P. A. (2004). *Plywood production*. Kyiv: Osnova. [In Ukrainian].
2. Bekhta, P. A., & Kusniak, I. I. (2019). The plywood properties with using thermoplastic film as glue. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 19, 209–222. <https://doi.org/10.15421/411943>
3. Bekhta, P. A., & Kusniak, I. I. (2020). The manufacturing method of the environmentally friendly wood composite materials based on the veneer. Patent of Ukraine for useful model. IPC V27N 3/00. № 141281; declared 29.10.19; published 25.03.20, № 6. [In Ukrainian].
4. Berdinsky, I. P. (1965). *Gluing of the wood*. Kyiv: Budivel'nik. [In Russian].
5. Biley, P. V. (2005). Theoretical basis of heat treatment and drying of wood. *Kolomyia: Vik*. [In Ukrainian].
6. 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].
7. Bryn, O. I., & Bekhta, P. A. (2012). Design of warming up impregnated veneer process. *Scientific Bulletin of UNFU*, 22(1), 358–361. Retrieved from: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvntlu\\_2012\\_22.1\\_66](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvntlu_2012_22.1_66). [In Ukrainian].
8. Chudinov, B. S. (1968). *Theory of the wood heat treatment*. Moscow: The science. [In Russian].
9. Dolatich, Ia. A., Iliasov, S. G., & Krasnikov, V. V. (1973). *Vozdeistvie IK-izlucheniia na drevesinu*. Riga : Izd-vo "Zinatne", 496 p. [In Russian].
10. Foros, V. V. (2018). Tekhnolohiia vyhotovlennia fanery z popere dnm infrachervonym prohrivanniam paketiv shponu. *Scientific Bulletin of UNFU*, 26(4), 303–308. [In Ukrainian].
11. Goto, T., Saiki, H., Onishi, H. (1982). Studies on wood gluing. XIII: Gluability and scanning electron microscopic study of wood-polypropylene bonding. *Wood Sci. Technol*, 16, 293–303. <https://doi.org/10.1007/BF00353157>
12. Kajaks, J., Reihmane, S., Grinbergs, U., Kalniņš, K. (2012). Use of innovative environmentally friendly adhesives for wood veneer bonding. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 61(3), 207–211. <https://doi.org/10.3176/proc.2012.3.10>
13. Lustosa, ECB, Del Menezzi, CHS, de Melo, R. R. (2015). Production and properties of a new wood laminated veneer/high-density polyethylene composite board. *Materials Research*, 18(5), 994–999. <https://doi.org/10.1590/1516-1439.010615>
14. Ortynska, G. Ye., Bekhta, P. A., & Bakalets, A. V. (2010). Mathematical model of plywood fabrication by using the veneer with high moisture content. *Scientific Bulletin of UNFU*, 20(10), 308–312. Retrieved from: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematiczna-model-protsehu-vigotovlennya-faneri-iz-shponu-pidvischenoi-vologosti/viewer>. [In Ukrainian].
15. Ozarkiv, I. M., Soroka, L. Ya., & Hrytsyuk, Yu. I. (1997). *Fundamentals of aerodynamics and heatmass transfer*. Kyiv: Institute of tools and teaching methods. [In Ukrainian].
16. Polosin, A. N., Chistyakova, T. B., & Pogorelsky, A. M. (2010). Mathematical model of the heating layered polymer and polymer-textile materials for control thermoforming soundproof products process. *Modern problems of science and education*, 6, 95–101. Retrieved from: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=4562>.
17. Priimenko, S. G. (1995). Optimization of the hot isostatic pressing of porous materials based on the improved mathematical model of the process. *Kramatorsk*, 16 p. [In Russian].
18. Sevastyanov, K. F. (1976). *The intensification of the gluing plywood process*. Moscow: Forestry. [In Russian].
19. Shevchenko, S. A., Zaiets, V. M., & Gerasymchuk, V. L. (2016). Mathematical modeling of temperature field in manufacture of wood-polymer composite by hot pressing. *Bulletin of the Kharkiv*

- National Technical University of Agriculture*, 178, 70–77. Retrieved from: <http://dspace.khntusg.com.ua/bitstream/123456789/1855/1/13.pdf>.
20. Song, W., Wenbang, W., Congrong, R., & Shuangbao, Z. (2016). Developing and evaluating composites based on plantation eucalyptus rotary-cut veneer and high-density polyethylene film as novel building materials. *BioResources*, 11(2), 3318–3331. Retrieved from: [https://bioresources.cnr.ncsu.edu/BioRes\\_11/BioRes\\_11\\_2\\_3318\\_Song\\_WRZ\\_Developing\\_Composites\\_Rotary\\_Venner\\_HDPE\\_Film\\_8770.pdf](https://bioresources.cnr.ncsu.edu/BioRes_11/BioRes_11_2_3318_Song_WRZ_Developing_Composites_Rotary_Venner_HDPE_Film_8770.pdf).
21. Suberlyak, V. A., & Bashtannik, P. I. (2007). *Technology of the polymers and composites processing*. Lviv: "Raster-7" Publishing. [In Ukrainian].
22. Yearbook of Forest Products 2017. FAO. (2019). Retrieved from: [http://www.fao.org/3/ca5703\\_m/ca5703\\_m.pdf](http://www.fao.org/3/ca5703_m/ca5703_m.pdf).

**P. A. Bekhta, R. O. Kozak, I. I. Kusniak**

*Ukrainian National Forestry University, Lviv, Ukraine*

## **MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF WARMING OF VENEER PACKAGE GLUED WITH THERMOPLASTIC FILM**

A promising variety of the wood composite materials is plywood glued with thermoplastic polymers. However, making such a wood composite requires adjustment of the pressing modes, because there is a slight difference between the hot method of pressing veneer packages glued with thermoplastic films and the method of pressing the veneer packages glued with thermosetting adhesives. Among the main processes that occur in plywood gluing are heat and mass transfer. The availability of the thermoplastic film between the veneer sheets is going to change the thermal conductivity of the package, and therefore will affect the pressing duration. If suppose, that the package has a plate appearance, which is located between heated to the certain temperature pressed plates, then the known Fourier-Kirchhoff thermal differential equation could be applied. The basis for the model development of the warming package veneer glued with thermoplastic film is laid in the methods of nonlinear programming, uniform search and conjugate gradient. On the offered mathematical model basis, the temperature field change in the package thickness during the plywood gluing with plastic film is calculated, the calculation of the warming duration indicators of the veneer package is done and this indicator dependence on the thermoplastic film flow rate and the pressing temperature is defined. The duration of the warming veneer package glued with thermoplastic film depends on the temperature at which the thermoplastic polymer will change from a highly elastic to the viscous state. The transition of the thermoplastic film LDPE to the viscous state begins at 125 °C and lasts up to 240 °C. With increasing of the press temperature plates from 140 to 180 °C the duration of warming up the middle of the package to 125 °C decreases by 89 % for all investigated polymer costs is defined. Changing the polymer content in the package does not significantly affect the duration of its warming. With increasing of the thermoplastic film flow rate from 130 g/m<sup>2</sup> to 190 g/m<sup>2</sup>, the duration of warming up the middle of the veneer package to 125 °C increases slightly from 3.8 to 4.2 % depending on the pressing temperature. To verify the validity of the model, experiments to measure the temperature inside the veneer package during its pressing were carried out. The values of theoretical and experimental dependencies are close, which confirms the adequacy of the developed model.

**Keywords:** rotary cut veneer; low density polyethylene; thermal conductivity; specific heat capacity; packet density; fluidity temperature.